



HAL
open science

Développement de réseaux radio d'objets connectés pour les Villes Intelligentes : amélioration de la Qualité de Service du réseau LoRa

Maxime Mroue

► To cite this version:

Maxime Mroue. Développement de réseaux radio d'objets connectés pour les Villes Intelligentes : amélioration de la Qualité de Service du réseau LoRa. Electronique. UNIVERSITE DE NANTES, 2019. Français. NNT: . tel-02415918

HAL Id: tel-02415918

<https://hal.science/tel-02415918v1>

Submitted on 17 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES
ECOLE POLYTECHNIQUE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : *Electronique*
Par

Maxime MROUE

**Développement de réseaux radio d'objets connectés pour les Villes
Intelligentes : amélioration de la Qualité de Service du réseau LoRa**

Thèse présentée et soutenue à Polytech Nantes – site de la Roche-sur-Yon, le 3 décembre 2019
Unité de recherche : IETR UMR CNRS 6164

Rapporteurs avant soutenance :

Pascal LORENZ
Fabrice VALOIS

Professeur des Universités, Université de Haute Alsace
Professeur des Universités, INSA de Lyon

Composition du Jury :

Présidente : Nathalie MITTON
Examineurs : Pascal LORENZ
Fabrice VALOIS

Directrice de Recherche, Inria Lille-Nord Europe
Professeur des Universités, Université de Haute Alsace
Professeur des Universités, INSA de Lyon

Dir. de thèse : Eduardo MOTTA CRUZ
Co-dir. de thèse : Benoît PARREIN
Sofiane HAMRIOUI

HDR, Directeur de la Chaire Télécom & Réseaux, Université de Nantes
Maître de Conférences, HDR, Université de Nantes
Maître de Conférences Associé, Université de Nantes

Invité(s)

Wilfried VINCE
Armel LE BLANC

Responsable Cellule Smart Territoires, SPIE CityNetworks
Directeur du développement commercial, SPIE CityNetworks

REMERCIEMENTS

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ma thèse et à l'élaboration de ce modeste travail.

Je voudrais remercier M. Fabrice VALOIS, Professeur à l'INSA de Lyon, et M. Pascal LORENZ, Professeur à l'Université de Haute Alsace, d'avoir accepté d'évaluer ce manuscrit de thèse et de faire partie du jury.

Je voudrais exprimer ma gratitude à Mme. Nathalie MITTON, Directrice de Recherche à l'Inria Lille-Nord Europe, d'avoir accepté faire de partie du jury.

Mes sincères gratitudes à M. Eduardo MOTTA CRUZ, le directeur de ma thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses multiples conseils et pour tout ce que nous avons partagé pendant toutes ces années. J'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail. C'était un réel plaisir de travailler avec lui.

Mes remerciements vont également à Benoît PARREIN et Sofiane HAMRIOUI pour m'avoir encadré, en me transmettant leurs conseils et leur regard scientifique de haut niveau. Un merci particulier à Przemyslaw BAKOWSKI pour son intuition inégalée d'ingénieur.

Pour continuer, je remercie tout le personnel du SPIE CityNetworks. Plus particulièrement Gilles ROUYER, Wilfried VINCE et Armel LE BLANC pour m'avoir donné l'opportunité de travailler avec eux. Cela fut une expérience enrichissante et une rencontre unique que je n'oublierai pas.

Je remercie très amicalement Abbass NASSER pour m'avoir aiguillé et soutenu durant ces trois dernières années.

Je tiens également à remercier Corinne NICOLLEAU, secrétaire du département SRT, pour sa sympathie, son soutien moral et son amitié ainsi que mes collègues du bureau, Wassim SALEH et Gildas BENGLOAN, pour leur bonne humeur. Nous avons partagé des très bons moments.

Je ne remercierai jamais assez ma maman chérie qui m'a toujours soutenue et toujours fière de moi, ma sœur et mon frère d'avoir toujours été présents. Sans oublier ma femme pour ses encouragements, son soutien et pour son amour dévoué. Notre couple a grandi en même temps que mon projet scientifique, le premier servant de socle solide à l'épanouissement du second. Merci à mon petit trésor Zein-Charles qui a donné du sens à notre vie. Je vous aime tous d'un amour si grand!!!

Merci à tous pour avoir fait de ces trois années de thèse, une expérience unique et inoubliable !

La Roche-sur-Yon, Octobre 2019

Maxime MROUE

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	3
Glossaire	12
Introduction Générale	15
Contexte	15
Objectifs	16
Organisation du manuscrit	17
1 Les réseaux LPWAN et les Villes Intelligentes	20
1.1 Introduction	20
1.2 Les Villes Intelligentes	22
1.2.1 L'écosystème de services de Ville Intelligente	23
1.2.2 Les cas d'usage	27
a) Environnement intelligent	28
b) Parking intelligent	29
c) Éclairage intelligent	29
d) Gestion intelligente des déchets	30
1.3 Les caractéristiques des réseaux LPWAN	31
1.3.1 La portée	31
1.3.2 La consommation	34
1.3.3 Les coûts	39
1.3.4 L'évolutivité	40
1.3.5 La Qualité de Service	42
1.4 Technologies existantes	43
1.4.1 SigFox	43
1.4.2 Narrow Band IoT	44
a) Architecture	45
b) Les communications	46

TABLE DES MATIÈRES

1.5	Conclusion	47
2	Étude des performances du standard LoRa	49
2.1	Introduction	49
2.2	La couche physique de LoRa	49
2.2.1	Codage de la trame LoRa	51
2.3	La couche de liaison de LoRa : LoRaWAN	54
2.3.1	Les Communications LoRaWAN	56
2.3.2	Fonctionnement du protocole LoRaWAN	59
2.4	Étude analytique et simulation du taux d'erreur binaire pour LoRa	61
2.4.1	État de l'art des simulateurs LoRa	61
2.4.2	Etude analytique	64
2.4.3	Simulations et résultats	65
2.5	Réalisation de démonstrateurs	67
2.5.1	Démonstrateur pour Ville Intelligente	68
2.5.2	Démonstrateur d'abri-bus connecté	71
2.6	Conclusions	73
3	Évaluation des couches MAC des technologies IoT : LoRa, SigFox et NB-IoT	75
3.1	Contexte	75
3.2	La couche de contrôle d'accès au médium	77
3.2.1	LoRaWAN	78
3.2.2	Sigfox	78
3.2.3	Narrow Band IoT	78
3.3	Calcul du taux d'erreur de paquets (PER)	79
3.3.1	Paquet plus court que les paquets en collision	80
3.3.2	Paquet plus long que les paquets en collision	81
3.4	Évaluation du taux d'erreur de paquets pour LoRaWAN, Sigfox et NB-IoT	82
3.4.1	Modèle du système	82
3.4.2	Résultats de simulations	83
	a) LoRa	83
	b) NB-IoT	84
	c) Comparaison des résultats	85
3.5	Conclusions	86

4	LoRa+ : évolution de protocole LoRaWAN pour l'amélioration de la QoS	89
4.1	Introduction	89
4.2	État de l'art	90
4.3	Le protocole LoRa+	93
4.3.1	Spécifications du LoRa+ Classe A	93
4.3.2	Spécifications du LoRa+ Classe B	95
4.3.3	Fonctionnement du protocole LoRa+	96
4.4	Évaluation de LoRaWAN et LoRa+	99
4.4.1	Modèle de système et simulations	99
4.4.2	Comparaison des paquets rejetés avec LoRaWAN et LoRa+	100
4.4.3	Comparaison de PER pour LoRaWAN et LoRa+	103
4.4.4	Validation des simulations par rapport à l'état de l'art	104
4.5	Discussion de mise en œuvre	105
4.6	Conclusion	106
	Conclusions et Perspectives	109
	Liste des publications	114
	Bibliographie	130

LISTE DES FIGURES

1.1	Les domaines d'applications des technologies LPWAN.	21
1.2	Modèle de chaîne de valeur IoT.	25
1.3	Topologies en étoile, maillée et en arbre.	35
1.4	Le positionnement des LPWAN par rapport à d'autres technologies sans fil [45].	39
1.5	Modes de déploiement du NB-IoT [55].	45
2.1	Schéma de modulation LoRa [60].	52
2.2	Architecture d'un réseau LoRa [60].	55
2.3	Classes des terminaux LoRaWAN [69].	56
2.4	Fenêtres de la Classe A.	57
2.5	Fenêtres de la Classe B.	57
2.6	Fenêtres de la Classe C.	57
2.7	Diagrammes de séquence pour les classes A et B.	61
2.8	BER pour les transmissions LoRa.	66
2.9	Approximation et simulation du BER pour LoRa avec $SF = 7$, $CR = \frac{4}{5}, \frac{4}{8}$	67
2.10	Démonstrateur pour Ville Intelligente.	69
2.11	Page d'accueil de l'application mobile du démonstrateur pour Ville Intelligente.	70
2.12	Page du capteur d'environnement.	70
2.13	Conception d'une maquette pour l'abri-bus.	72
3.1	Collision de paquets avec des paquets transmis plus courts que des paquets en collision [92].	80
3.2	Collision de paquets avec des paquets transmis plus longs que des paquets en collision [92].	81
3.3	Simulation de l'évolution du PER pour LoRa en utilisant un SF unique jusqu'à 10 000 terminaux transmettant pendant une minute.	83

3.4	Simulation de l'évolution du PER pour LoRa en utilisant un SF unique jusqu'à 1000 terminaux transmettant pendant une minute.	84
3.5	Simulation de l'évolution du PER pour NB-LoT jusqu'à 50 000 terminaux transmettant pendant une minute.	85
3.6	Simulation du PER avec 30 000 terminaux transmettant dans une minute pour LoRa, Sigfox et NB-LoT 12-tones.	86
4.1	Chronogramme du LoRa+ Classe A.	94
4.2	Diagramme de séquence pour LoRa+ Classe A.	94
4.3	Trame de configuration pour la Classe A.	95
4.4	Chronogramme du LoRa+ Classe B.	95
4.5	Diagramme de séquence pour LoRa+ Classe B.	96
4.6	Logigramme complet de LoRa+ pour les classes A et B.	98
4.7	Modèle de système utilisé pour la simulation.	99
4.8	Simulation de taux de paquets rejetés de LoRaWAN en fonction du nombre de passerelles : pour les petites/moyennes villes (à gauche) et les zones rurales (à droite).	101
4.9	Simulation de taux de paquets rejetés de LoRa+ en fonction du nombre de passerelles pour les petites/moyennes villes (à gauche) et les zones rurales (à droite).	102
4.10	Pourcentage de paquets rejetés par rapport au nombre de passerelles pour LoRaWAN et LoRa+ dans les villes et les zones rurales.	103
4.11	Simulation de PER de LoRaWAN et LoRa+ pour les petites/moyennes villes utilisant une passerelle.	104

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Les projets des Villes Intelligentes en Europe.	27
1.2	Spécifications de NB-IoT.	45
1.3	Les canaux et les signaux de NB-IoT [57].	46
1.4	Définition du canal NPUSCH RU.	47
2.1	Débits, durées des symboles et sensibilité de LoRa en fonction de SF [65].	51
2.2	Correction d'erreur et capacités de détection de LoRa [66].	52
2.3	Paramètres de simulation du BER.	65
3.1	Les spécifications des protocoles LPWAN.	77
4.1	Configurations des passerelles et terminaux.	100

GLOSSAIRE

3GPP	Third Generation Partnership Project
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CHIRP	Compressed High Intensity Radar Pulse
CR	Coding Rate
CP	Cyclic Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EPS	Evolved Packet System
ETA	Estimated Time Arrival
FSK	Frequency-Shift Keying
FEC	Forward Error Correction
GSM	Global System for Mobile Communications
ICT	Information and Communication Technology
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standards Organization
LAN	Local Area Network
LiFi	Light Fidelity
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MTC	Machine Type Communication
NB	Narrowband
NB-IoT	Narrow Band IoT
OSI	Open Systems Interconnection
PER	Packet Error Rate

PN	Pseudo-Noise
QoS	Quality of Service
ROI	Return on Investment
RTS/CTS	Request to Send/Clear to Send
RU	Resource Unit
SCEF	Service Capability Exposure Function
SDR	Software-Defined Radio
SF	Spreading Factor
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference
TVWS	TV White Spaces
UIT	Union Internationale des Telecommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
UNB	Ultra-Narrowband
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
WLAN	Wireless Local Area Network

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans ce chapitre, nous introduisons le contexte de cette thèse ainsi que ses objectifs que nous nous sommes fixés, complétés par l'organisation du manuscrit.

Contexte

De nos jours, les concepts des Villes Intelligentes (*Smart Cities*) et de l'Internet des Objets (IoT) sont devenus essentiels dans le développement urbain. Ils permettent de surmonter plusieurs problèmes au niveau des infrastructures et des services publics. Leur domaines d'applications le plus remarquables ont été d'abord les systèmes de compteurs intelligents mesurant en temps quasi-réel la consommation d'électricité, d'eau et de gaz. Dans cette optique, les Villes Intelligentes et l'IoT ont attiré à la fois le marché et la communauté de recherche et de l'innovation vers le « tout connecté », où l'idée principale est de connecter la population et/ou les objets avec des services utilisés dans la vie quotidienne. Avec l'essor des réseaux de capteurs sans fil, les réseaux à faible puissance et à large couverture (*LPWAN*) est en train de devenir l'une des solutions clés pour la « transformation numérique » de la ville, à travers de nombreuses applications telles que la surveillance de la qualité de l'air (*Smart Environment*), le parking intelligent (*Smart Parking*), l'éclairage intelligent (*Smart Lighting*), la gestion intelligente des déchets (*Smart Waste*), etc.

Un réseau de capteurs sans fil est en fait un environnement interactif centré sur l'utilisateur reposant sur la communication radio de divers terminaux dans l'environnement, qui aide les utilisateurs à effectuer plus efficacement des tâches spécifiques ou à leur offrir des services plus intelligents. Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sont : 1) une faible puissance de transmission, 2) une couverture étendue, 3) un déploiement à grande échelle.

Dans ce contexte, les LPWANs sont proposés pour répondre à de nombreuses exigences non satisfaites par les réseaux WiFi ou cellulaires traditionnels. Ils permettent notamment :

- d'utiliser des bandes de fréquences sans licence, notamment la bande ISM (industriel, scientifique et médical) ;
- d'avoir une longue portée pouvant aller jusqu'à $20Km$ dans les zones rurales ;
- d'avoir un faible débit ne dépassant pas quelques $Kbps$;
- d'avoir une durée de vie de la batterie pouvant aller jusqu'à 10 ans.

Les organismes de normalisation (tels que l'IETF) ont alors poussé leurs recherches vers des infrastructures de réseau d'accès sans fil en prenant en compte les spécificités techniques des objets connectés. Il existe aujourd'hui une multitude de technologies radio capables de supporter les objets connectés, mais sont-elles aussi toutes capables de répondre aux spécificités imposées par l'loT ? Pour répondre à cette question, plusieurs techniques permettant aux réseaux LPWAN d'avoir une faible consommation énergétique avec une longue portée seront étudiées.

Objectifs

Dans l'objectif de répondre à la question posée dans le paragraphe précédent, la thèse défendue dans ce mémoire ouvre une voie pour comparer les principales technologies LPWAN dans le contexte des Villes Intelligentes et d'évaluer leurs performances. Nous proposons un protocole qui va permettre d'améliorer la qualité de service (QoS) pour les réseaux LoRaWAN en termes de plusieurs paramètres : le taux de paquets rejetés, le taux d'erreur de paquets et le nombre de passerelles déployées.

En contraste avec l'approche du modèle OSI, nous adoptons une démarche descendante et ascendante : de la passerelle vers le terminal et inversement. Nous proposons un protocole qui s'intègre facilement dans une pile de communication standard à travers une approche *cross layer* visant deux niveaux protocolaires : la couche physique et la couche d'accès au médium (MAC).

Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

1. analyse des technologies LPWAN dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil déployés dans une Ville Intelligente ;
2. évaluation et comparaison de performances pour trois technologies LPWAN : LoRa, SigFox et NB-IoT au niveau de la couche MAC ;
3. étude de la problématique de la QoS pour des réseaux LoRaWAN et introduction d'une métrique spécifique pour les réseaux LoRaWAN liée à la sensibilité des passerelles : le taux de paquets rejeté « Rejected Packet Rate » ;
4. proposition d'un nouveau protocole, intitulé « LoRa+ », pour améliorer la QoS de la technologie LoRa en termes de collisions et de taux de paquets rejetés ainsi que du nombre de passerelles déployées.

Organisation du manuscrit

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres.

Le **chapitre 1** présente un aperçu de l'évolution des réseaux LPWAN dans le contexte des Villes Intelligentes et de leurs besoins. Il décrit les caractéristiques et les techniques de conception des technologies LPWAN, pour ensuite détailler deux d'entre elles, à savoir SigFox et NB-IoT.

Le **chapitre 2** est consacré à la technologie LoRa en évoquant quelques simulateurs utilisés pour l'évaluation des performances en lien avec cette technologie. Nous présentons aussi la modulation LoRa ainsi qu'une analyse de performance en se focalisant sur le taux d'erreur binaire. Enfin, deux démonstrateurs de services de Villes Intelligentes sont présentés.

Le **chapitre 3** explore les fonctionnalités de la couche MAC pour trois technologies LPWAN : LoRa, SigFox et NB-IoT. Il s'agit ici d'identifier les différentes techniques au niveau MAC pour les trois technologies de manière à évaluer les performances de chacune en matière de taux d'erreur de paquets (PER).

Le **chapitre 4** reprend la technologie LoRa, notamment sur le protocole LoRaWAN. L'idée principale est de rendre ce protocole opportuniste, en écoutant les caractéristiques du canal avant de transmettre. Pour cela, nous changeons la séquence du protocole LoRaWAN en déplaçant la fenêtre de réception RX2 avant la fenêtre de transmission.

Enfin, dans la partie **conclusions et perspectives**, nous présentons une synthèse des contributions de cette thèse, en soulignant ses limites et en apportant des perspectives à ce travail.

LES RÉSEAUX LPWAN ET LES VILLES INTELLIGENTES

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu de l'évolution des réseaux à faible puissance et à large couverture (LPWAN) et de leurs besoins dans le contexte des Villes Intelligentes. Nous abordons des techniques de conception des technologies LPWAN et nous introduisons celles présentes sur le marché, en mettant l'accent sur SigFox et NB-IoT.

1.1 Introduction

Les réseaux à faible puissance et à large couverture, représentent un nouveau paradigme de communication, venant compléter les technologies cellulaires traditionnelles sans fil et à courte portée. L'objectif de ces réseaux est de répondre aux diverses exigences des applications des Villes Intelligentes et de l'Internet des Objets. Les technologies LPWAN se distinguent des autres technologies sans fil par une connectivité étendue pour les terminaux avec une faible consommation et à faible débit de données. Cette caractéristique les rend populaires : environ un quart de l'ensemble des 30 milliards de terminaux IoT à l'horizon 2025 devront être connectés à Internet via des réseaux radio sans fil [1]. La Figure 1.1 illustre diverses applications dans plusieurs secteurs d'activité faisant appel aux technologies LPWAN. Ces secteurs d'activité incluent, entre autres, la Ville Intelligente, les applications IoT personnelles, le réseau électrique intelligent, le comptage intelligent, la surveillance industrielle, l'agriculture.

Les réseaux LPWAN sont uniques car ils assurent des compromis entre différentes technologies, utilisées dans le contexte de l'IoT, telles que les réseaux sans fil à courte

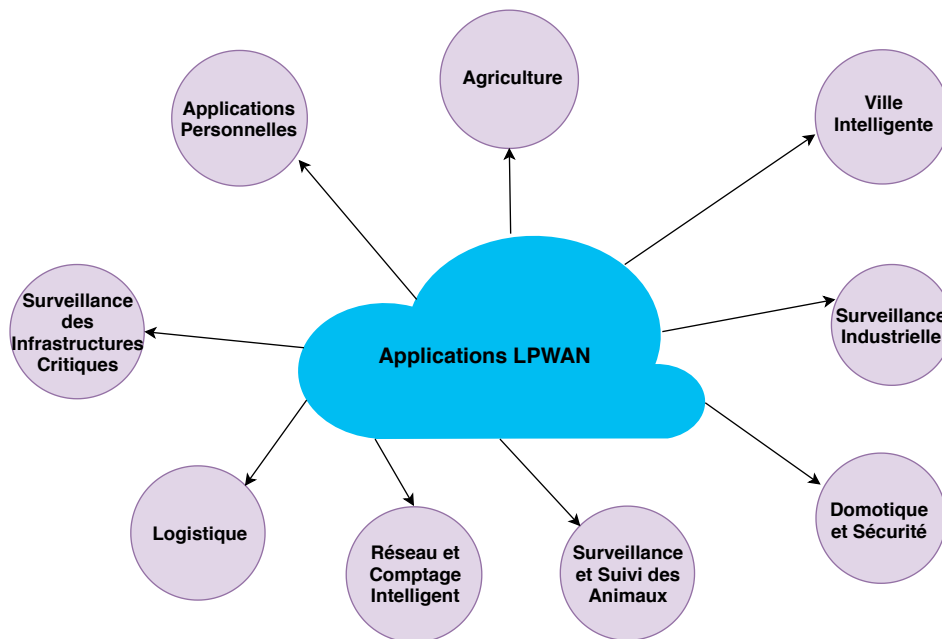


FIGURE 1.1 – Les domaines d’applications des technologies LPWAN.

portée (ZigBee, Bluetooth, Z-Wave, WLAN, Wi-Fi) et les réseaux cellulaires traditionnels (GSM, UMTS et LTE). En effet, les premiers ne sont pas idéales pour connecter des terminaux à basse consommation, répartis sur de grandes zones géographiques. La portée de ces technologies est limitée à quelques centaines de mètres au mieux. Par conséquent, les terminaux ne peuvent pas être déployés ou déplacés arbitrairement n’importe où, ce qui est nécessaire pour de nombreuses applications dans les villes et les territoires [2]. Pour y remédier, un déploiement dense de terminaux et l’utilisation de passerelles connectés via un réseau maillé multi-sauts sont nécessaires, avec un impact sur les coûts de déploiement. Les WLAN se caractérisent par des zones de couverture plus courtes et une consommation d’énergie plus élevée pour les Communications de Type Machine, MTC.

Quant aux réseaux cellulaires de deuxième et troisième génération, ils assurent une couverture plus étendue et plus adaptée pour la communication du type Machine-à-Machine, M2M. Toutefois, l’utilisation non licenciée des bandes de fréquences attribuées à certains standards a permis d’élargir le domaine des technologies à faible puissance. En général, les technologies cellulaires traditionnelles n’atteignent pas une efficacité énergétique suffisante pour offrir une autonomie de batterie de quelques an-

nées. La complexité et le coût des terminaux cellulaires sont élevés en raison de leur capacité à traiter des formes d'onde complexes pour faire face au débit, à la mobilité et à la localisation.

Les LPWANs ne sont pas conçues pour traiter tous les cas d'utilisation de l'IoT mais plutôt destinées aux applications qui tolèrent les retards et les faibles débits, et nécessitant généralement une faible consommation d'énergie et un faible coût. Les applications MTC sont classées alors dans la catégorie *MTC Massive* et pas dans la catégorie des applications *MTC critiques* [3], nécessitant une latence ultra faible et une fiabilité extrêmement élevée. Les applications *MTC critiques* sont par conséquent hors du domaine des technologies LPWAN vu qu'elles ne répondent pas à leurs exigences strictes en termes de performances, notamment une grande fiabilité et une latence de 1 à 10 ms. Pour cette raison, les technologies LPWAN ne sont pas adaptées à de nombreuses applications industrielles IoT, véhicules à véhicules (V2V) et véhicules à infrastructures (V2I) [4]. Cependant, elles répondent toujours aux besoins d'une multitude d'applications pour les villes et les territoires. C'est la raison pour laquelle plusieurs standards LPWAN ont vu le jour ces dernières années, notamment LoRa [5] et SigFox [6], utilisés de plus en plus par les applications des Villes Intelligentes. Nous proposons de les traiter dans la section suivante.

1.2 Les Villes Intelligentes

Le développement urbain a entraîné un changement de paradigme au 21^e siècle et les activités de recherche sur les Villes Intelligentes sont devenues une tâche prioritaire, avec la participation directe des entités politiques et industrielles et de la communauté scientifique, en raison de l'augmentation continue de la population dans ces villes. Dans ce contexte, les Nations Unies estiment qu'entre 2015 et 2050, la population mondiale augmentera de 32%, soit de 7,3 à 9,7 milliards d'habitants, tandis que la population urbaine augmentera de 63%, de 3,9 à 6,3 milliards d'habitants. La croissance sera significative en Afrique, en Asie et en Amérique latine [7, 8]. Le phénomène de l'urbanisation est dû, d'une part, à la migration de la population des zones rurales vers les villes, dans l'espoir d'une vie meilleure (pour l'emploi, l'éducation, les soins médicaux, la culture, etc.), et d'autre part aux migrations en provenance de pays

pauvres ou en conflits sociaux et militaires vers les pays en paix ou industrialisés. Dans ces conditions en 2050, l'Inde atteindra 1,7 milliard d'habitants, avec ses mégalo-poles Mumbai (42 millions) et New Delhi (36 millions). La Chine restera stable à 1,34 milliards d'habitants, avec la ville de Shanghai (21 millions), tandis que le Nigéria et l'Indonésie atteindront respectivement 399 millions et 321 millions d'habitants [7].

Pendant que notre planète devient de plus en plus "urbaine", les villes doivent devenir plus innovantes. L'urbanisation étendue requiert de nouvelles techniques permettant de gérer la complexité de la vie urbaine : la consommation d'eau, d'électricité et d'aliments, la gestion des ressources et protection de l'environnement, la gestion du trafic et la gestion des déchets.

Bien que les villes n'occupent que 2% de la surface de la planète, en 2018 elles hébergeaient environ 55% de la population mondiale, consommaient 75% du total de l'énergie produite et étaient responsables de 80% de l'effet de serre [9, 10]. C'est la raison pour laquelle le développement urbain et les problèmes qui y sont associés ont fait l'objet de débats approfondis ces dernières années lors de nombreuses conférences internationales ^{1 2 3 4}.

En substance, la création de Villes Intelligentes est devenue une stratégie logique pour atténuer les problèmes résultants de l'urbanisation rapide et de la croissance de la population urbaine. Malgré les coûts qui leur sont associés, les Villes Intelligentes, une fois mises en œuvre, peuvent réduire la consommation d'énergie, la consommation d'eau, les émissions de carbone, les besoins en transport et les déchets urbains.

1.2.1 L'écosystème de services de Ville Intelligente

Parmi les nombreuses définitions de Ville Intelligente, nous retenons les deux suivantes, données par les organismes de normalisation, car elles sont à la fois précises et complètes. Le groupe de travail de l'UIT sur les Villes Intelligentes et durables a analysé près de 100 définitions et les a résumé en ceci : «Une Ville Intelligente et durable est une ville innovante qui utilise les technologies de l'information et de la communica-

-
1. IEEE International Forum on Smart Grids for Smart City (Paris, octobre 2016).
 2. World Smart City Forum (Singapore, juillet 2016).
 3. International Conference on Smart Grids for Smart Cities (Toronto, octobre 2015).
 4. Smart City Expo World Congress (Barcelona, novembre 2011).

tion (ICT) et d'autres moyens pour améliorer la qualité de la vie, l'efficacité des opérations et des services urbains et la compétitivité, tout en veillant à ce qu'elle réponde aux besoins des générations actuelles et futures. aux aspects économiques, sociaux et environnementaux » [11]. Une autre définition qui peut être considérée comme la plus complète est celle de l'ISO, dans laquelle la Ville Intelligente est vue comme «un nouveau concept et un nouveau modèle, qui applique les nouvelles technologies de l'information, telles que l'Internet des objets, le cloud computing, l'intégration des données et les informations spatiales/géographiques, afin de faciliter la planification, la construction, la gestion et les services intelligents des villes » [12].

La Ville Intelligente représente bien plus qu'une simple utilisation de la technologie pour faciliter les services urbains, mais plutôt une stratégie globale spécifique à chaque ville, qui identifie clairement ses objectifs stratégiques et définit des directives pratiques pour les atteindre. Les Villes Intelligentes requièrent une approche de gestion totalement nouvelle de leurs infrastructures et de leurs services, ainsi que des mécanismes de communication innovants avec leurs citoyens. Un processus continu et itératif doit être mis en place pour identifier, déployer et proposer de nouveaux services orientés vers les citoyens, tandis que ceux-ci sont invités à participer aux services déployés et à venir. Dans un tel environnement dynamique, les projets pilotes sont généralement utilisés pour tester les avantages de la transformation numérique sur le terrain.

Un écosystème de services pour une Ville Intelligente ne désigne pas seulement la ville elle-même, mais tout ce que la ville et ses environs impliquent, comme des citoyens avec leurs activités sociales, leurs infrastructures et leurs technologies. C'est un terme large qui dépasse les limites de la ville et évolue avec chaque nouveau service, nouvel ensemble de terminaux en réseau, nouvelle infrastructure ou même actuelle, utilisée de manière nouvelle «alimentée par l'ICT». En introduisant les technologies de l'IoT, les villes deviennent de plus en plus un organisme vivant capable de répondre aux besoins des citoyens, mais pouvant également se corriger si nécessaire, en apprenant de l'environnement comment réagir dans différentes situations, en fonction de l'expérience des citoyens. Il convient de noter que les villes possèdent et exploitent déjà une vaste infrastructure qui peut être «mise en réseau».

Un écosystème de services Villes Intelligentes se compose de plusieurs services regroupant divers "objets", déployés sur le terrain, tels que les terminaux, les capteurs, les actionneurs et les passerelles. En plus des objets, une couche réseau fournit la connectivité des objets aux plates-formes IoT. Les plates-formes IoT sont généralement déployées dans une infrastructure de cloud et elles offrent des services permettant de récupérer des lectures brutes générées par des terminaux en réseau. Les plates-formes IoT sont également responsables de la gestion des données et servent de sources pour l'analyse de données et/ou la fourniture de services de niveau supérieur proposés aux utilisateurs. Suivant cette architecture complexe, le déploiement, la maintenance opérationnelle et la réalisation d'un service Ville Intelligente basé sur l'IoT nécessite que différentes parties assument des rôles spécifiques dans chacun des services répertoriés précédemment. Par conséquent, plusieurs fournisseurs dans une relation de partenariat sont généralement impliqués dans la fourniture d'un service final au citoyen. La figure 1.2 décrit les parties prenantes identifiées et un modèle de chaîne de valeur IoT pour les Villes Intelligentes [13].

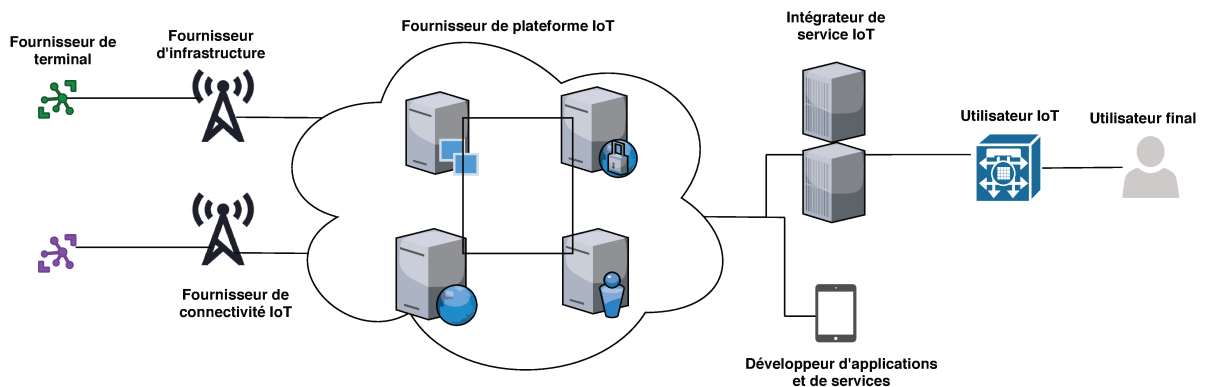


FIGURE 1.2 – Modèle de chaîne de valeur IoT.

Nous pouvons distinguer cinq rôles principaux dans la dite chaîne :

- Fournisseur d'infrastructure : fournit des terminaux IoT et une infrastructure connectée à Internet. Dans le cas où un réseau de télécommunications est utilisé pour fournir la connectivité (filaire ou sans fil), un fournisseur d'infrastructure est un fournisseur de services de communications. Ce réseau doit être construit, installé et maintenu en conditions opérationnelles et il comporte la totalité ou une partie de la transmission de signaux via des réseaux de communication radio.

- Fournisseur de plateforme IoT : offre une plateforme IoT et des fonctions de système pour un accès aux données des terminaux gérés, ainsi qu'une intégration des données pour le développement de nouveaux services. Il est responsable du contrôle des terminaux et de la collecte des données provenant de divers capteurs. L'utilisation de protocoles standard est la clé du succès de son modèle d'entreprise.
- Intégrateur de service IoT : un fournisseur de services Smart City liés à l'IoT basé sur une ou plusieurs plateformes IoT apportant une valeur ajoutée aux services de plateforme sous-jacents.
- Utilisateur IoT : un acheteur d'un service Ville Intelligente qui utilise de nouveaux composants en réseau dans ses produits (par exemple, un compteur intelligent) et / ou fournit des services innovants (par exemple, un service de compteurs intelligents) aux utilisateurs finaux. Les utilisateurs de l'IoT interagissent directement avec les fournisseurs d'infrastructure et utilisent les services de bas niveau fournis dans leur infrastructure, ou avec les intégrateurs de services de l'IoT qui proposent des services de haut niveau groupés sur les plateformes IoT.
- Utilisateur final : un utilisateur situé à la fin de la chaîne de valeur de l'IoT qui achète et / ou utilise un service Ville Intelligente pouvant être une personne privée ou une entreprise.

Les services de Villes Intelligentes déployés utilisent généralement des solutions propriétaires incompatibles entre elles et peuvent tout aussi bien être implémentées en tant que solutions fermées. Cela crée une fragmentation élevée qui a été identifiée dans [14] comme l'un des plus grands défis pour la croissance de l'écosystème de la Ville Intelligente. Pour surmonter l'organisation traditionnelle des villes, où chaque service public est responsable de ses propres fonctionnalités, des solutions interopérables sont nécessaires et bien que cela ne soit pas strictement lié à la technologie. La résolution de cet obstacle nécessite également un changement de mentalité des employés de la ville ou des changements organisationnels. L'interopérabilité, telle que définie par le comité technique de l'ETSI [15], indique la capacité d'un équipement de différents fabricants (ou de différents systèmes) à communiquer entre eux au sein de la même infrastructure (même système). Dans le contexte de Ville Intelligente, la syntaxe et la sémantique sont les aspects d'interopérabilité les plus importants. La syntaxe fait référence à l'utilisation de protocoles et de formats de données ouverts et normalisés, tandis que la sémantique concerne des solutions et des schémas pour

décrire les informations créées par des capteurs dans différentes applications, afin de permettre un échange d'informations utile entre différents services de la ville. Les solutions existantes sont généralement basées sur des modèles de données propriétaires, qui ne sont pas compris ni reconnus par d'autres services, se traduisant par un processus d'intégration fastidieux de terminaux et de données dans des domaines et des solutions IoT.

1.2.2 Les cas d'usage

Un exemple typique de service Ville Intelligente est le Smart Metering, qui utilise des compteurs intelligents pour mesurer la consommation d'électricité. Ces mesures sont accessibles à distance pour offrir des informations en temps réel sur la consommation d'énergie. Le Smart Parking est un autre exemple populaire : il s'agit en général du premier service à être déployé dans une ville, car il réduit considérablement le temps de recherche d'emplacement libre. Il existe de nombreux autres exemples tels que la détection de fuites d'eau, le transport intelligent, l'éclairage intelligent ou la détection de pollution de l'air. Ces services sont disponibles et déployés aujourd'hui dans plusieurs villes du monde.

TABLE 1.1 – Les projets des Villes Intelligentes en Europe.

Ville	Nom du projet	Services	Technologies sans fil	année
Santander	SmartSantander	Smart lighting Smart waste Smart mobility	Zigbee-Pro WiFi NFC 3G	2012
Lyon	Grand LYON métropole	Smart lighting Smart grid Smart mobility	LoRa Zigbee NFC 3G	2013
Anvers	City of Things	Smart environment Smart parking Smart mobility	SigFox LoRa WiFi BLE DASH7	2015
Amsterdam	Am"smart"erdam	Smart lighting Smart grid Smart mobility Smart waste	LoRa	2016

Nous pouvons voir des exemples significatifs de villes européennes telles que Lyon avec le partenariat SPIE [16, 17], Anvers [18], Santander [19, 20] et Amsterdam [21],

qui créent des écosystèmes dynamiques d'applications citoyennes innovantes basées sur des données ouvertes comme indiqué dans le Tableau 1.1.

Nous proposons dans ce qui suit d'identifier les exigences spécifiques de quatre principaux services de Ville Intelligente, à savoir l'environnement intelligent, le Parking intelligent, l'éclairage intelligent et la gestion intelligente des déchets.

a) Environnement intelligent

L'environnement intelligent est aujourd'hui un type de service émergent qui nécessite une participation et un engagement actif des citoyens. L'expression «détection de confluence» décrit les services et les applications «où des personnes disposant d'appareils de détection et d'informatique partagent collectivement des données et extraient des informations pour mesurer et cartographier des phénomènes d'intérêt commun» [22]. Par exemple, un tel service peut être utilisé pour la surveillance de la qualité de l'air ou du bruit dans les rues urbaines afin de couvrir de manière dense les zones urbaines avec des mesures effectuées à des micro-emplacements spécifiques difficiles à atteindre par des stations de mesure statiques officielles.

L'environnement intelligent vise à améliorer la durabilité des villes ainsi que la qualité et la sécurité de la vie des citoyens, par exemple en créant des cartes de pollution d'air et du bruit [23]. Cela permet de détecter rapidement les conditions dangereuses et permet aux autorités de réagir en conséquence, par exemple en limitant le trafic dans une zone touchée, en avertissant les citoyens, ou même évacuer des zones entières de la ville [24]. En outre, l'environnement intelligent peut détecter des catastrophes naturelles telles que des tremblements de terre, des éruptions volcaniques, des tornades, des inondations et des incendies de forêt [23]. Les systèmes d'alerte précoce peuvent contribuer de manière significative à limiter le nombre de victimes et à réduire les dommages matériels. Idéalement, ces systèmes fonctionnent en association avec d'autres aspects de la Ville Intelligente, tels que les transports intelligents pour contrôler les flux de trafic ou les services publics intelligents pour arrêter les centrales électriques dans la zone dangereuse.

b) Parking intelligent

D'après [25, 26], entre 1927 et 2001, plusieurs études portant sur la navigation dans les centres-villes embouteillés ont révélé que les conducteurs passent en moyenne entre 14,57 minutes à trouver une place de parking et le trafic généré par la recherche de le stationnement dans les grandes villes est passé de 8% à 74%. Pour rendre le trafic plus fluide, les villes installent des capteurs sur les parkings afin de détecter les espaces disponibles. Traditionnellement, les informations provenant des capteurs sont fournies à l'aide d'écrans LCD dans la rue, mais de nos jours, les applications mobiles qui fournissent des informations en temps réel sur les places de stationnement disponibles prévalent. En outre, ces applications peuvent également fournir une navigation intégrée pour guider les automobilistes vers un emplacement disponible. L'un des défis de ces applications est d'empêcher que quelqu'un d'autre ne gare la voiture à un endroit déjà attribué.

En raison de leur nature, les services Smart Parking ont un grand nombre d'utilisateurs finaux, citoyens et visiteurs. Le service doit fournir des informations en temps réel sur les places de stationnement disponibles pour un lieu spécifique. Une application mobile est généralement fournie gratuitement car les coûts de déploiement et de maintenance d'une solution déployée peuvent être couverts par les frais de stationnement. Des services supplémentaires, par exemple la réservation de places de stationnement, peuvent également être facturés. L'application mobile doit fournir la localisation GPS d'un utilisateur. Le service est donc basé sur la localisation. La politique de confidentialité pour les utilisateurs finaux doit être formulée et mise en œuvre conformément au Règlement général de Protection des Données (RGDP) [27, 28].

c) Éclairage intelligent

La réduction de la consommation d'électricité est l'un des thèmes le plus important du développement durable des zones urbaines. L'éclairage public consomme une grande partie d'électricité des villes en raison de son fonctionnement continu la nuit. Selon le rapport de la commission européenne [29], qui fait partie de la stratégie numérique pour l'Europe [30], l'éclairage public représente jusqu'à 60% des coûts en électricité d'une municipalité. En outre, les anciens lampadaires sont sujets aux pannes et coûteux à entretenir, ce qui augmente les coûts d'éclairage.

L'éclairage public intelligent fait référence à un service où l'éclairage public s'adapte aux mouvements des piétons, des cyclistes et des voitures. Grâce aux capteurs de présence et aux caméras intégrés, ces solutions peuvent en outre collecter et transmettre des informations qui aident les villes à surveiller et à faire face aux situations critiques pour la sécurité. Des capteurs et des caméras peuvent être utilisés pour détecter les embouteillages ou pour que l'application Smart Parking surveille les espaces de stationnement disponibles. Notez qu'un lampadaire peut également héberger des terminaux supplémentaires, tels que des capteurs environnementaux.

d) Gestion intelligente des déchets

La gestion des déchets est l'un des défis les plus sensibles dans les zones urbaines du monde et elle devient un problème critique dans les pays en développement où une augmentation rapide de la population a été observée. La collecte des déchets est un processus qui nécessite l'utilisation de grosses sommes d'argent et une gestion complexe de la logistique.

Toutes les villes, quelle que soit leur taille, leur situation géographique ou leur niveau économique, dépensent des sommes importantes chaque année pour la collecte des déchets. Le nombre de poubelles situés dans les rues et le nombre de véhicules utilisés pour les vider sont généralement estimés sur la base du nombre de citoyens, mais l'estimation résultante est parfois soit trop élevée, soit trop basse. Cela se traduit par la fourniture d'un service médiocre ou des coûts élevés. De plus, la collecte des déchets, quel que soit le type de matériau (recyclé ou non trié), est généralement fixée chaque semaine sans tenir compte de l'état réel du niveau de saturation de chaque bac. Le résultat est la collecte des poubelles semi-vides ou l'accumulation des ordures dégradant les conditions d'hygiène de la ville.

La prévision du meilleur moment pour effectuer le ramassage des ordures et l'optimisation du nombre de véhicules et de conteneurs placés dans les rues ne sont devenues des opérations réalisables que si un flux d'informations constant sur la quantité de déchets par jour est fourni. Des études sur la gestion des déchets ont examiné l'analyse de la charge en prenant en compte la quantité de déchets collectés et éliminés dans les décharges [31]. À l'inverse, la diffusion des capteurs à faible coût dotés

d'une batterie permet de collecter des données sur la quantité de déchets produits directement sur site et en temps réel. En surveillant le remplissage des poubelles à l'aide de divers types de capteurs, il est possible de réaliser un système plus efficace. Si le système est également capable de réagir de manière appropriée aux événements qui se produisent en temps réel en appliquant différentes stratégies en fonction de l'événement lui-même, on peut définir le système de « gestion intelligente des déchets ».

De plus, dans un contexte de Ville Intelligente, il est également important de permettre aux citoyens d'interagir avec les informations disponibles produites par la ville, à tout moment et à partir de tout appareil [32]. De nouvelles applications centrées sur l'utilisateur seront développées et apporteront de nouvelles formes d'interaction, utilisant la production de données de capteurs et les réseaux sociaux.

1.3 Les caractéristiques des réseaux LPWAN

Comme évoqué précédemment, le succès des technologies LPWAN réside dans leur capacité à offrir une connectivité à faible consommation à un nombre considérable de terminaux, répartis sur de grandes zones géographiques, à faible coût. Cette section décrit les techniques utilisées par les technologies LPWAN pour atteindre ces objectifs souvent contradictoires. Nous soulignons que les technologies LPWAN partagent certains des objectifs de conception avec d'autres technologies sans fil. L'objectif principal des technologies LPWAN est toutefois d'atteindre une large portée avec une faible consommation d'énergie et un faible coût, contrairement aux autres technologies pour lesquelles il peut être plus important d'obtenir un débit plus élevé, une latence réduite et une fiabilité accrue.

1.3.1 La portée

Les technologies LPWAN sont conçues pour couvrir une large zone et permettre une bonne propagation du signal vers des endroits intérieurs difficiles d'accès tels que les sous-sols. Sur le plan quantitatif, un gain de +20 dB par rapport aux systèmes cellulaires existants est visé. Cela permet aux terminaux de se connecter aux passerelles à une distance de quelques dizaines de kilomètres, en fonction de l'environnement de

déploiement (rural, urbain, etc.). La bande sous 1 GHz et les schémas de modulation spéciaux, décrits ci-après, sont exploités pour atteindre cet objectif.

- (a) *Utilisation des fréquences sous 1 GHz* : À l'exception de quelques technologies LPWAN (par exemple, WEIGHTLESS-W [33] et INGENU [34]), la plupart utilisent des fréquences porteuses inférieures à 1 GHz, qui offre une communication robuste et fiable avec des budgets de puissance faibles. Premièrement, comparés à la bande 2,4 GHz, les signaux à basse fréquence subissent moins d'atténuation et d'évanouissements par trajets multiples causés par des obstacles et des surfaces denses telles que des murs en béton. Deuxièmement, la bande sous 1 GHz est moins encombré que 2,4 GHz, cette bande étant utilisée par la plupart des technologies sans fil populaires, telles que le Wi-Fi, les téléphones sans fil (DECT), Bluetooth, ZigBee et d'autres appareils électroménagers. La disponibilité accrue qui en résulte permet une communication de longue portée. Néanmoins, la technologie RPMA d'INGENU [34] est une exception qui exploite toujours la bande des 2,4 GHz en raison de l'assouplissement de la réglementation du spectre sur le rapport cyclique (Duty cycle) et de la puissance de transmission maximale dans cette bande dans plusieurs régions du monde.
- (b) *Techniques de Modulation* : Les technologies LPWAN sont conçues pour atteindre un budget de liaison⁵ de 150 ± 10 dB qui permet une portée de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres dans les zones urbaines et rurales respectivement. La couche physique conditionne le débit de données élevé et ralentit le taux de modulation afin de mettre plus d'énergie dans chaque bit (ou symbole) transmis. Pour cette raison, les récepteurs peuvent décoder correctement les signaux fortement atténués. La sensibilité typique des récepteurs LPWAN atteint aussi des niveaux de sensibilité inférieures à -130 dBm. Deux classes de techniques de modulation, à savoir les techniques à bande étroite et à spectre étalé, ont été adoptées par différentes technologies LPWAN.
- **Bande étroite** : Les techniques de modulation à bande étroite fournissent un budget de liaison élevé en codant le signal dans une faible bande passante (généralement inférieure à 25 kHz). En attribuant à chaque porteuse une bande très étroite, ces techniques de modulation partagent très efficacement le spectre global entre plusieurs liaisons. Le niveau de bruit ressenti dans une seule bande étroite est également minime. Par conséquent,

5. **Link budget.**

aucun gain de traitement par désétalement de fréquence n'est nécessaire pour décoder le signal au récepteur, ce qui permet une conception simple et peu coûteuse de l'émetteur-récepteur. NB-IoT et WEIGHTLESS-P sont des exemples de technologies à bande étroite.

Quelques technologies LPWAN compressent chaque signal de porteuse dans une bande ultra étroite d'une largeur aussi courte que 100 Hz (par exemple, dans SigFox), réduisant davantage le bruit expérimenté et augmentant le nombre de terminaux pris en charge par unité de bande passante. Cependant, le débit de données effectif de chaque terminal diminue également, ce qui augmente le temps pendant lequel la radio doit rester allumée. Ce faible débit de données, associé aux réglementations de spectre relatives au partage des bandes sous 1 GHz, peut limiter la taille maximale et la fréquence de transmission des paquets de données, limitant ainsi le nombre de cas d'utilisation professionnelle. SigFox et WEIGHTLESS-N sont quelques exemples de technologies LPWAN qui utilisent la modulation UNB.

- **Étalement du spectre** : Les techniques d'étalement du spectre étalent un signal à bande étroite sur une bande de fréquence plus large mais avec la même densité de puissance. La transmission réelle est un signal de type bruit plus difficile à détecter par un intrus, plus résistant aux interférences et résistant aux attaques par brouillage. Toutefois, il faut plus de gain de traitement du côté du récepteur pour décoder le signal généralement reçu en dessous du bruit de fond. La diffusion d'un signal à bande étroite sur une large bande entraîne une utilisation moins efficace du spectre. Mais, ce problème est généralement résolu par l'utilisation de plusieurs séquences orthogonales. Tant que plusieurs terminaux utilisent des canaux et/ou des séquences orthogonales différents, ils peuvent tous être décodés simultanément, ce qui augmente la capacité globale du réseau. Différentes variantes des techniques d'étalement du spectre sont utilisées par les normes existantes. Le spectre d'étalement de propagation (CSS) et le spectre d'étalement par séquence directe (DSSS) sont utilisés respectivement par LoRa et RPMA.

1.3.2 La consommation

Le fonctionnement à très faible consommation d'énergie est une condition essentielle pour tirer parti de l'énorme opportunité commerciale offerte par les terminaux IoT alimentés par batterie. Une durée de vie de la batterie de 10 ans ou plus avec des piles AA ou à pile bouton est souhaitable pour réduire les coûts de maintenance. Une basse consommation dépend des paramètres suivants :

- (a) **Topologie** : la topologie maillée largement utilisée pour étendre la couverture des réseaux sans fil à courte portée est constituée par une multitude de relais ou terminaux connectés à une passerelle (voir figure 1.3 (a)). Toutefois, son coût de déploiement élevé constitue un inconvénient majeur pour la connexion d'un grand nombre de terminaux répartis géographiquement. En outre, comme le trafic est transféré sur plusieurs sauts assurés par les relais vers une passerelle, certains terminaux sont plus encombrés que d'autres, en fonction de leur emplacement ou de la configuration du trafic réseau. Par conséquent, ils épuisent rapidement leurs batteries, limitant la durée de vie globale du réseau à quelques mois à seulement [35, 36].

D'autre part, une grande gamme de technologies LPWAN surmonte ces limitations en connectant des terminaux directement aux passerelles, évitant ainsi le recours à des déploiements denses et coûteux de relais et de passerelles. La topologie résultante est une étoile (voir figure 1.3 (b)) qui est largement utilisée dans les réseaux cellulaires et apporte un avantage en matière d'économie d'énergie. Contrairement à la topologie maillée, les terminaux ne doivent pas perdre d'énergie précieuse en écoutant d'autres terminaux qui souhaitent relayer leur trafic par leur intermédiaire. Une passerelle permanente permet un accès pratique et rapide aux terminaux. En plus de la topologie en étoile, quelques technologies LPWAN prennent en charge les topologies en arbre (voir figure 1.3 (c)) et maillées, mais avec une complexité supplémentaire dans la conception des protocoles.

- (b) **Cycle de service** : On obtient un fonctionnement à faible consommation en désactivant de manière opportuniste les composants énergivores des terminaux M2M/IoT [37, 38], par exemple un émetteur-récepteur de données. Le cycle de service permet aux terminaux LPWAN d'éteindre leurs émetteurs-récepteurs lorsqu'ils ne sont pas nécessaires, ils sont activés uniquement lorsque les don-

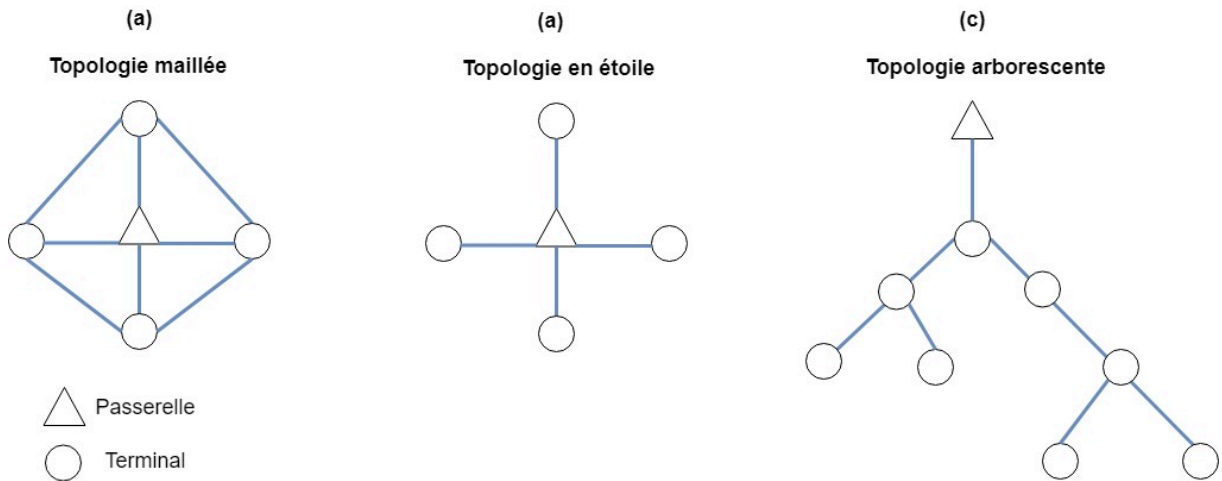


FIGURE 1.3 – Topologies en étoile, maillée et en arbre.

nées doivent être transmises ou reçues.

Les mécanismes du cycle de service sont adaptés entre autres facteurs en fonction de l'application, du type de source d'alimentation et du modèle de trafic. Si une application doit transférer les données uniquement sur la liaison montante (du terminal vers la passerelle), les terminaux peuvent se réveiller uniquement lorsque les données sont prêtes à être transmises. En revanche, si des transmissions en liaison descendante (de la passerelle vers le terminal) sont également nécessaires, les terminaux veillent à écouter lorsque la passerelle transmet effectivement. Les terminaux y parviennent en convenant d'un programme d'écoute. En occurrence, les terminaux peuvent écouter pendant une courte durée après leurs transmissions montantes pour recevoir une réponse. Ils peuvent aussi se réveiller à une heure convenue avec la passerelle. Pour les terminaux alimentés par le réseau électrique nécessitant une communication en liaison descendante à une latence ultra faible, l'émetteur-récepteur radio peut rester en mode éveillé. Dans le domaine des technologies LPWAN, l'utilisation du cycle de service n'est pas seulement un mécanisme d'économie d'énergie, mais également une exigence réglementaire. Les réglementations régionales sur le partage du spectre [39] peuvent limiter le temps qu'un seul terminal peut occuper pour assurer sa coexistence avec d'autres terminaux partageant le même canal.

Le cycle de service peut également être étendu au-delà de l'émetteur-récepteur à d'autres composants matériels, comme cela a été exploré dans le contexte

de nombreux réseaux LPWAN [40, 41] : la conception matérielle peut permettre de choisir différents modes de fonctionnement et d'activer ou de désactiver des composants matériels individuels (tels que des composants auxiliaires, des dispositifs de stockage et des micro-contrôleurs). En exploitant ces techniques de gestion de l'alimentation, les développeurs d'applications LPWAN peuvent réduire davantage la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie de la batterie. Différentes normes LPWAN, telles que LoRaWAN [5], définissent plusieurs classes de terminaux en fonction de leurs besoins en communication sur les liaisons montante ou descendante.

En Europe, le plupart des technologies LPWAN fonctionne dans la bande ISM en utilisant 1% du cycle de service, cela signifie que, durant les 3600 dernières secondes, un terminal ne doit jamais avoir transmis plus de 36 secondes de transmission.

- (c) **Protocole d'accès au medium simplifié** : les protocoles MAC les plus largement utilisés pour les réseaux cellulaires ou les réseaux sans fil à courte portée sont trop complexes pour les technologies LPWAN. En effet, les réseaux cellulaires synchronisent les stations de base et les terminaux avec précision pour bénéficier des schémas MAC complexes qui exploitent la diversité de fréquence et de temps. La surcharge de contrôle de ces systèmes, bien que justifiable pour les terminaux cellulaires puissants, est substantielle pour les terminaux LPWAN. De plus, il est difficile d'obtenir une synchronisation très stable requise par ces systèmes avec des terminaux ultra bas coût (1 à 5 \$) dotés d'oscillateurs peu coûteux et de faible qualité. Lors de l'accès au spectre, ces terminaux subissent une dérive dans les domaines de temps et de fréquence, faisant de l'accès au support partagé un défi primordial pour les terminaux concurrents. Pour cette raison, les schémas d'accès aléatoire simples sont plus populaires pour les technologies LPWAN.

L'accès multiple par détection de porteuse avec prévention des collisions CSMA-CA est l'un des protocoles MAC les plus courants déployés avec succès dans les WLAN et autres réseaux sans fil à courte portée. Le nombre de terminaux par passerelle est limité pour ces réseaux. Cependant, à mesure que le nombre de ces terminaux augmente dans les réseaux LPWAN, la détection de porteuse des transmissions en cours devient moins efficace et plus coûteuse [42], ce qui affecte négativement les performances du réseau. Alors que la détection de por-

teuse virtuelle utilisant le mécanisme RTS/CTS est utilisée pour résoudre ce problème, elle introduit une surcharge de communication supplémentaire sur les liaisons montante et descendante. Avec le grand nombre de terminaux, à priori les technologies LPWAN ne peuvent pas supporter cette surcharge de signalisation excessive. En outre, l'asymétrie de liaison, propriété de nombreuses technologies LPWAN, réduit l'aspect pratique de la détection de porteuse virtuelle.

Pour ces raisons, plusieurs technologies LPWAN, telles que SigFox et LoRaWAN, ont recours à ALOHA, un protocole MAC à accès aléatoire dans lequel les terminaux transmettent sans recourir à la détection de porteuse, rendant leurs émetteurs-récepteurs simples et peu coûteux. Néanmoins, INGENU et NB-IoT considèrent également que les protocoles MAC basés sur le TDMA permettent d'allouer les ressources radio plus efficacement, bien qu'au prix d'une complexité et d'un coût accrus pour les terminaux. Nonobstant, des recherches se produisent pour appliquer le TDMA au LoRaWAN [43].

- (d) **Simplification de la complexité des terminaux** : La plupart des technologies simplifient la conception des terminaux en les déchargeant des tâches complexes vers les passerelles. En règle générale, les passerelles exploitent la diversité matérielle et sont capables de transmettre et d'écouter plusieurs terminaux en utilisant plusieurs canaux ou signaux orthogonaux simultanément. Cela permet aux terminaux d'envoyer des données en utilisant n'importe quel canal ou signal orthogonal disponible tout en atteignant la passerelle et sans nécessiter une signalisation coûteuse pour lancer la communication. En intégrant certaines informations dans le cœur du réseau, les terminaux peuvent également bénéficier d'une communication radio du dernier kilomètre plus fiable et plus économe en énergie. LoRaWAN est un exemple notable dans lequel le cœur du réseau adapte les paramètres de communication (tels que les paramètres de débit / modulation) pour maintenir de bonnes connexions en liaisons montante et descendante. En outre, le cœur du réseau est également responsable de la prise en charge des terminaux afin qu'ils se déplacent sur plusieurs passerelles et suppriment les éventuelles réceptions en double.

Outre la communication, le traitement des données peut également être déchargé des terminaux avec quelques compromis. Étant donné la diversité des applications IoT, celles-ci peuvent avoir des exigences différentes, en particulier la

fréquence de transmission des données. Certaines applications peuvent nécessiter que les terminaux communiquent fréquemment des données (par exemple, toutes les minutes), d'autres invitent les terminaux à communiquer moins fréquemment les données, par exemple, une fois par jour [44]. Du point de vue de la consommation d'énergie, il est bien connu qu'une opération de communication consomme plus d'énergie qu'une opération de traitement de signal. Par conséquent, une question clé qui revient souvent est de savoir si toutes les données doivent être transmises telles quelles ou si elles doivent être traitées localement et ensuite transmises (réduisant le besoin). La première approche ne nécessite aucune capacité de traitement significative sur le terminal, ce qui implique que des terminaux à faible coût peuvent être réalisés. Dans la deuxième approche, et en fonction de la sophistication du traitement requis, le coût du terminal augmentera probablement, tout en réduisant la consommation d'énergie nécessaire au transport des données comme le montre la Figure 1.4 [45]. Le choix entre les deux approches dépend entre autres du modèle économique au cas par cas. Bien qu'il soit toujours souhaitable de disposer de terminaux à faible coût, en particulier en raison de leur grand nombre, il peut être avantageux de recourir à un traitement local si le coût de la communication est important. De même, si le coût de la communication ne dépend pas du volume de données (en raison de la tarification forfaitaire), il peut alors être avantageux de disposer de terminaux plus simples. Il est également nécessaire d'estimer les coûts associés au fonctionnement d'un terminal avec et sans traitement sophistiqué. En d'autres termes, comment le coût augmente-t-il si le terminal doit être remplacé souvent en raison de l'épuisement de la batterie causé par des communications fréquentes contre le déploiement d'un terminal légèrement plus coûteux en premier lieu, qui communique moins souvent mais n'épuise pas sa batterie ? Du point de vue de l'exploitant du réseau, il peut être souhaitable de réduire la quantité de trafic sur son réseau par un traitement local sur les terminaux, conservant ses performances. Cela peut toutefois être indésirable si le modèle économique de l'opérateur repose sur une tarification non basée sur le volume de données.

Le paradigme consistant à traiter les données plus près du terminal, désigné récemment avec "Edge Computing", est une forte tendance du secteur, comme en témoigne l'essor d'initiatives telles que OpenFog [46] et Mobile Edge Computing [47]. Cela dit, il n'existe pas de solution simple, binaire et à taille unique, au

problème du transport de données brutes ou du traitement local de la donnée. Comme mentionné précédemment, ceci se résume en réalité aux exigences de l'application et à l'analyse du retour sur investissement (ROI) du réseau pour ceux qui souhaitent déployer de telles solutions.

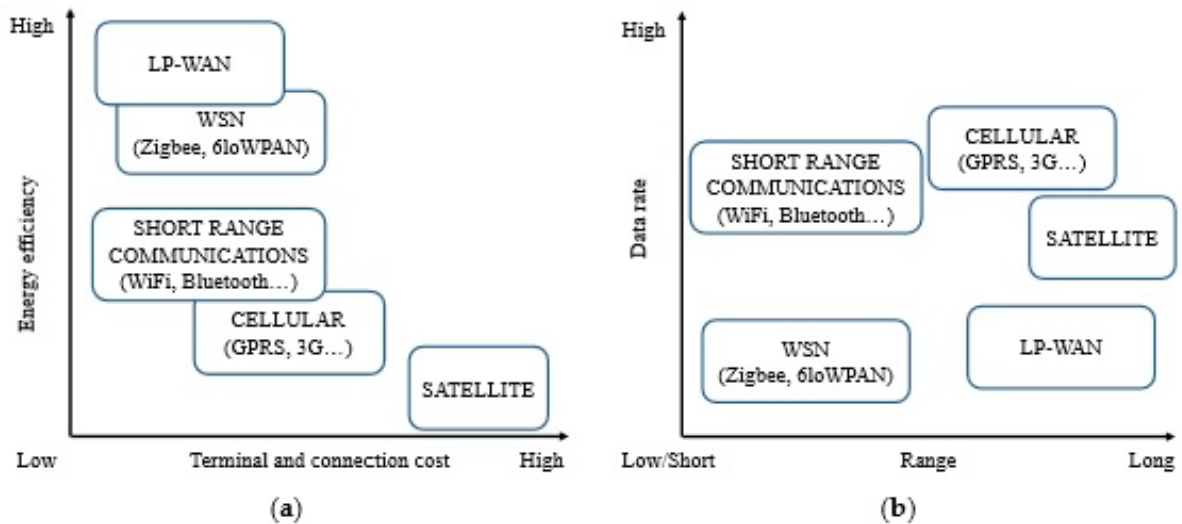


FIGURE 1.4 – Le positionnement des LPWAN par rapport à d'autres technologies sans fil [45].

1.3.3 Les coûts

Le succès commercial des réseaux LPWAN est lié à la connexion d'un grand nombre de terminaux, tout en maintenant le coût du matériel en dessous de 5\$ [48, 49] et l'abonnement de connectivité par unité à 1\$. Cette abordabilité permet aux technologies LPWAN non seulement de s'adresser à un large éventail d'applications, mais aussi de concurrencer favorablement dans les domaines où les technologies sans fil à courte portée et les réseaux cellulaires sont déjà bien établis. Les technologies LPWAN adoptent plusieurs méthodes pour réduire les CAPEX et les OPEX pour les utilisateurs et les opérateurs de réseau. La conception à faible coût des terminaux est rendue possible par plusieurs techniques, dont certaines ont été déjà décrites précédemment dans la section 1.3.2. L'utilisation d'une connectivité de type en étoile (au lieu d'un maillage), de simples protocoles MAC et de techniques permettant de réduire la

complexité des terminaux permet aux fabricants de concevoir des terminaux simples et donc économiques. D'autres techniques sont résumées dans ce qui suit.

- (a) **Réduction de la complexité du matériel du terminal** : Comparés aux technologies cellulaires et sans fil à courte portée, les émetteurs-récepteurs LPWAN doivent traiter des formes d'onde moins complexes. Cela leur permet de réduire l'empreinte spectrale de l'émetteur-récepteur, les débits de données et la taille de la mémoire, en minimisant la complexité matérielle [50].
- (b) **Infrastructure minimale** : Les technologies câblées ou sans fil traditionnelles souffrent d'une portée limitée, ce qui nécessite un déploiement d'infrastructures denses : passerelles, câbles électriques, nœuds de relais, etc. Cependant, une seule passerelle LPWAN peut connecter des dizaines de milliers d'appareils finaux répartis sur plusieurs kilomètres, ce qui réduit considérablement les coûts pour les opérateurs de réseau.
- (c) **Utilisation de bandes sans ou avec licence** : les coûts supportés par les opérateurs de réseau pour l'octroi de licences destinées aux réseaux LPWAN se heurtent à un déploiement compétitif et mise rapide sur le marché⁶. En effet, la plupart des technologies LPWAN envisage le déploiement dans les bandes sans licence, y compris la bande ISM ou les espaces blancs télévisés. Cependant, NB-IoT défini comme le standard LPWAN de 3GPP, peut partager les bandes cellulaires déjà exploitées par les opérateurs de réseau mobile afin d'éviter des coûts de licence supplémentaires. L'avantage de l'utilisation d'une bande exclusive réside dans la maîtrise de la Qualité de Service. Les technologies LPWAN sont tributaires en revanche d'une dégradation des performances due à une augmentation du nombre de terminaux connectés utilisant un spectre partagé.

1.3.4 L'évolutivité

La prise en charge d'un grand nombre de terminaux échangeant des faibles volumes de trafic est l'une des principales exigences des technologies LPWAN. Ces technologies doivent donc s'adapter au nombre et à la densité croissants de terminaux connectés. Plusieurs techniques sont envisagées pour faire face à cette contrainte :

- (a) **La diversité** : pour exploiter le plus grand nombre possible de terminaux connectés, il est essentiel d'exploiter efficacement la diversité de canaux, de temps,

6. **Time-to-Market.**

d'espace et de matériel. Du fait de la faible puissance et de la nature peu coûteuse des terminaux, une grande partie de ceci est réalisée grâce à l'action des fonctions de composants plus puissants dans les réseaux LPWAN tels que les passerelles et le cœur du réseau. Les technologies LPWAN utilisent des communications multi-canaux et multi-antennes. Les communications multi-canaux sont plus résistantes aux interférences. Les communications multi-antennes sont utilisées pour mettre en parallèle les transmissions vers et depuis les terminaux connectés.

- (b) **La densification** : pour faire face à l'augmentation de la densité des terminaux dans certaines zones, les réseaux LPWAN, comme les réseaux cellulaires traditionnels, auront recours à un déploiement dense de passerelles. Le problème, cependant, est de le faire sans accroître le niveau d'interférences entre les terminaux et les passerelles. De nouvelles approches de densification pour les réseaux LPWAN nécessitent des recherches plus approfondies car les techniques cellulaires existantes reposent sur une gestion bien coordonnée des ressources radio au sein et entre les cellules, hypothèse qui n'est pas vraie pour la plupart des technologies LPWAN.
- (c) **La sélection de canal adaptatif et débit de données** : non seulement les systèmes LPWAN doivent évoluer en fonction du nombre de terminaux connectés, mais il convient également d'optimiser les liaisons pour une communication fiable et écoénergétique. Adapter les schémas de modulation, sélectionner de meilleurs canaux pour assurer la portée ou effectuer un contrôle de puissance de transmission adaptatif nécessitent une surveillance efficace des qualités de la liaison et une coordination entre les terminaux et le réseau.

La possibilité d'une sélection et d'une modulation adaptatives des canaux dépend de chaque technologie LPWAN. Différents facteurs tels que l'asymétrie de liaison et le facteur de service radio maximal admissible peuvent limiter la possibilité de mécanismes adaptatifs très robustes. Dans le cas où la passerelle est incapable de fournir des informations en retour sur la qualité de la communication de la liaison montante et/ou d'informer les terminaux pour adapter leurs paramètres de communication, ces derniers utilisent un mécanisme très simple pour améliorer la qualité de la liaison : la transmission répétée du même paquet plusieurs fois, souvent sur plusieurs canaux sélectionnés au hasard, dans l'espoir qu'au moins une copie parvienne à la passerelle avec succès. On peut soutenir que de tels

mécanismes améliorent la fiabilité de la communication de liaison montante optimisée, tout en maintenant la complexité et le coût des terminaux très bas. Dans les cas où une communication en liaison descendante peut permettre l'adaptation de paramètres de liaison montante, les passerelles ou le cœur du réseau peuvent jouer un rôle essentiel dans la sélection de paramètres tels que le canal ou le débit optimal pour améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique.

En résumé, il existe un compromis évident entre l'évolutivité du réseau et la simplicité des terminaux à faible coût. La plupart des technologies LPWAN permettent aux terminaux de faible puissance d'accéder à des ressources radio limitées de manière généralement non coordonnée et aléatoire, limitant ainsi le nombre de terminaux pouvant être pris en charge par les réseaux. Le nombre important d'études menées dans la littérature [4, 51, 52] révèlent des limites pratiques à l'évolutivité des réseaux LPWAN notamment en termes de QoS.

1.3.5 La Qualité de Service

Les technologies LPWAN ciblent un ensemble varié d'applications avec des exigences variées en termes de Qualité de Service (QoS). Certaines applications ne l'exigent pas (tels que le compteur intelligent), tandis que d'autres leur performance en dépend fortement (tels que les alarmes générées par les applications de sécurité résidentielle). Pour les normes cellulaires où les ressources radio peuvent être partagées entre LPWAN et les applications haut débit mobiles, des mécanismes devront être définis pour la coexistence de différents niveaux de débit.

Lorsque les utilisateurs des technologies LPWAN parlent de QoS, ils font généralement référence à des exigences particulières pour la remise des messages, telles que le temps d'arrivée, la probabilité de réussite de la réception et le taux de rejection de paquets. La plupart des utilisateurs comprennent qu'il existe des compromis liés à la QoS. Par exemple, le délai de transmission des messages est souvent causé par un encombrement du réseau. Un simple surdimensionnement du réseau peut donc améliorer la qualité de service. Des courts délais de retard limitent généralement la capacité des terminaux à passer en mode veille et réduisent donc la durée de vie de la batterie. La meilleure approche consiste à mettre en place un système flexible capable d'obtenir différents résultats en termes de QoS en fonction des besoins, en privilégiant le trafic à haute QoS (comme les alarmes) par rapport au trafic le plus bas.

À l'heure actuelle, les technologies LPWAN n'implémentent que des techniques et des mécanismes leurs permettant d'obtenir une QoS limitée.

1.4 Technologies existantes

Dans cette section, nous présentons deux technologies LPWAN utilisées couramment qui sont SigFox et NB-IoT, avec leurs aspects techniques. Ces deux technologies seront comparées à la technologie LoRa dans le chapitre 2 et afin d'évaluer ses performances.

1.4.1 SigFox

SigFox est une norme propriétaire pour les réseaux IoT à longue portée qui exploite la bande étroite (NB) ou bien la bande ultra-étroite (UNB). Elle utilise une méthode de modulation standard appelée BPSK qui reprend des parties de spectre très étroits (100Hz , ce qui donne 8 000 canaux) et modifie la phase de l'onde porteuse pour coder les données. Cela permet au récepteur d'écouter uniquement dans une très petite tranche du spectre, ce qui atténue les effets du bruit. Il en résulte une grande sensibilité qui permet une communication à longue portée ($30\text{-}50\text{km}$ en zones rurales et $3\text{-}10\text{km}$ en zones urbaines) et à faible débit (100bps), à condition qu'il n'y ait pas d'interférence [53]. Les premières versions de SigFox ne supportent que la communication unidirectionnelle en liaison montante, c'est-à-dire du terminal vers la passerelle, mais les versions plus récentes permettent la communication bidirectionnelle est aussi prise en charge.

A cause de son faible débit, l'envoi d'un paquet SigFox nécessite un temps de transmission de l'ordre de quelques secondes, ce qui le rend susceptible d'entrer en collision avec d'autres technologies. Et comme SigFox n'utilise aucune technique permettant d'éviter les collisions et que les transmissions à bande étroite elles mêmes constituent une source d'interférence, un terminal SigFox peut facilement interférer les systèmes à large bande.

Contrairement aux systèmes de communication radio peu coûteux utilisés par les terminaux, les passerelles SigFox utilisent une plate-forme radio définie par logiciel

pour écouter simultanément les 8000 canaux. Pour garantir une fiabilité de 99,9%, chacun des messages est envoyé 3 fois sur des fréquences différentes afin de garantir qu'il sera correctement reçu par au moins une des passerelles dans la plage de couverture. Compte tenu des limitations strictes en matière de puissance de transmission fixé par exemple en Europe a 1% de cycle de service également, il est possible d'envoyer jusqu'à 140 messages de liaison montante de 12 octets maximum par jour par objet et de recevoir jusqu'à 4 messages de liaison descendante de 8 octets. Un seul réseau géré par SigFox est en cours de déploiement dans le monde entier, un peu comme un réseau cellulaire en termes de itinérance (roaming).

En résumé, la technologie SigFox convient plus à des applications IoT de liaison montante très spécifiques et à très faible débit de données. En raison de son modèle fermé, il est difficile pour les chercheurs et les entreprises externes d'apporter des améliorations SigFox. Toutefois, en raison de sa popularité, il doit être pris en compte en tant qu'interfère pour les autres technologies LPWAN.

1.4.2 Narrow Band IoT

Le standard Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) fait partie de la norme 13 [54] et a été configuré par 3GPP dans les systèmes cellulaires afin de prendre en charge l'internet des objets (Cellular IoT : CIoT) à très faible complexité et à faible débit. Il définit une nouvelle technologie d'accès radio pouvant être intégrée dans la norme LTE tout en reprenant des fonctions LTE existantes et en supprimant d'autres pour une meilleure simplicité, à faible coût et une consommation minimale. Les nouvelles fonctionnalités de ce protocole incluent la suppression du transfert intercellulaire, de l'agrégation de porteuses et les mesures permettant de surveiller la qualité du canal. NB-IoT fonctionne sur les mêmes fréquences sous licence utilisées par LTE et utilise les modulations QPSK et BPSK. Ces principales spécifications sont illustrées par le Tableau 1.2.

TABLE 1.2 – Spécifications de NB-IoT.

Spécification	Support
Standard	3GPP release 2015
bande de fréquence	Même bande que LTE
Modulation	BPSK & QPSK
Portée (Km)	jusqu'à 15
Débit (Kbps)	jusqu'à 50
Topologie	Etoile

La couche physique de NB-IoT est conçue pour s'adapter à la bande passante du système à 200 kHz utilisée par les liaisons montante et descendante. Cela permet à NB-IoT de bénéficier de la fonctionnalité de déploiement sur le standard GSM en tant qu'entité autonome et en LTE en tant que bande interne (in-band) ou bande de garde (guard-band), comme illustré à la Figure 1.5 [55].

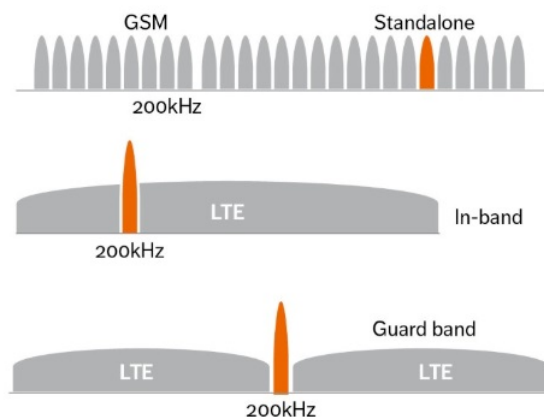


FIGURE 1.5 – Modes de déploiement du NB-IoT [55].

a) Architecture

NB-IoT utilise la même architecture de réseau que LTE mais avec quelques optimisations pour répondre aux besoins massifs des utilisateurs de l'IoT. Cette architecture est basée essentiellement sur le système de paquet évolué (EPS) [56]. Un nouveau nœud a été ajouté à l'architecture, appelé *fonction d'exposition de capacité de service* (SCEF), conçu pour les données de type machine. Deux optimisations sont définies pour CloT dans EPS : optimisation du plan de commande CloT EPS et optimisation du plan utilisateur CloT EPS. Les deux optimisations peuvent être utilisées pour envoyer

des données à l'application correspondante. Sur le plan utilisateur, les données IP et non IP sont transférées de la même manière que pour le trafic de données classique. Il n'y a pas de différence dans l'architecture du réseau d'accès par rapport à LTE dans la mesure où la passerelle est directement connectée au cœur du réseau. Les passerelles sont connectées ensemble à un interface bien qu'il n'y ait pas de transfert intercellulaire, cette interface permet une reprise rapide de la connexion lorsque le terminal passe de l'état IDLE-STATE à RRC-CONNECTION.

b) Les communications

La couche physique et l'allocation de ressources de NB-IoT portent sur les différents canaux et signaux pour la liaison descendante (DL) et la liaison montante (UL), comme illustré par le Tableau 1.3 [57]. En plus, nous nous concentrons sur les deux canaux UL.

TABLE 1.3 – Les canaux et les signaux de NB-IoT [57].

	Canal	Usage
UL	Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH)	Uplink dedicated data
UL	Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH)	Random access
DL	Narrowband Physical Downlink Control Channel (NPDCCH)	Uplink and downlink scheduling information
DL	Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)	Downlink dedicated and common data
DL	Narrowband Physical Broadcast Channel (NPBCH)	Master information for system access
DL	Narrowband Synchronization Signal (NPSS/NSSS)	Time and frequency synchronization

Le canal de signalisation NPRACH peut être utilisé par le terminal dans la procédure de canal d'accès aléatoire aux cellules, où le préambule est transmis. Un préambule est basé sur une sous-porteuse unique d'un groupe unique, avec des sauts de fréquence pour un seul utilisateur. Chaque groupe de symboles possède un préfixe cyclique (CP) suivi de cinq symboles. Le saut est entre groupes de symboles alors que le saut pseudo-aléatoire concerne les répétitions de groupes.

Différentes tailles de cellules peuvent être obtenues avec un espacement des sous-porteuses de 3,75 kHz, avec une longueur de symbole de 267 μs et deux longueurs de CP : 66,7 μs (10 km) et 267 μs (35 km). NPRACH a trois configurations de ressources dans une cellule, chacune correspondant à un niveau de couverture différent.

Le canal NPUSCH est conçu pour transporter des données de la liaison montante et envoyer des acquittements. Il offre une couverture étendue, une longue durée de vie de la batterie et une grande capacité. Ce canal a deux formats : le premier format est utilisé pour envoyer des données sur la liaison montante (bloc de transport maximal : 1000*bits*). Le Tableau 1.4 montre le plus petit nombre d'unités de ressources temps-fréquence (RU). Pour les RUs avec une sous-porteuse, BPSK et QPSK peuvent être utilisés, tandis que pour les autres RUs, le QPSK est appliqué. Le deuxième format est utilisé pour signaler un acquittement HARQ pour le canal de liaison descendante NPDSCH. Dans ce cas, le schéma de modulation est toujours BPSK. Il utilise toujours une sous-porteuse d'une longueur de 4 emplacements⁷. Dans le cas d'un espacement de 3,75 kHz, une RU a une durée de 8 ms, tandis que dans une sous-porteuse de 15 kHz, elle est de 2 ms.

TABLE 1.4 – Définition du canal NPUSCH RU.

Espacement des sous-porteuses	Nombre de tons	Nombre de symboles SC-FDMA ⁸	Temps de transmission
15 KHz	12	14	1 ms
15 KHz	6	28	2 ms
15 KHz	3	56	4 ms
15 KHz	1	112	8 ms
3.75 KHz	1	112	32 ms

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu du concept de la Ville Intelligente et des réseaux LPWAN. Nous avons montré que la création des Villes Intelligentes est une stratégie logique pour atténuer les problèmes résultant de l'urbanisation rapide et de la croissance de la population urbaine. Malgré les coûts qui leurs sont associés, les Villes Intelligentes, une fois mises en œuvre, peuvent réduire la consommation

7. Slots.

d'énergie, la consommation d'eau, les émissions de carbone, les besoins en transport et les déchets urbains. En outre, nous avons détaillé l'écosystème de services des Villes Intelligentes ainsi que les plus importants cas d'usage. Nous avons décrit les besoins techniques et le but de conception des technologies LPWAN pour prendre en charge les déploiements IoT. Nous avons discuté les avantages des réseaux LPWAN par rapport aux réseaux cellulaires (l'autonomie et le coût des terminaux, la portée, l'utilisation de la bande ISM sans licence). Les réseaux LPWAN représentent un nouveau modèle de communication qui complète les technologies sans fil et cellulaire en prenant en compte la diversité des applications IoT. En effet, les technologies LPWAN n'implémentent que des techniques et des mécanismes leurs permettant d'obtenir une QoS limitée. Pour cela, la QoS des réseaux LPWAN est l'un des principaux défis futurs. Enfin, nous avons présenté en détail deux technologies LPWAN SigFox et NB-IoT auxquelles sera comparée la technologie LoRa qui fera l'objet du prochain chapitre.

ÉTUDE DES PERFORMANCES DU STANDARD LoRa

Dans ce chapitre, nous décrivons la technologie LoRa selon ses deux aspects : la couche physique « propriétaire » et la couche MAC ouverte « Open Source ». Nous présentons également les résultats de l'évaluation des performances de la modulation LoRa sur notre simulateur LoRa.

2.1 Introduction

LoRa est une technologie qui a été développée par Cycleo [4] et commercialisée essentiellement par Semtech [58]. Elle propose une couche physique permettant une communication sans fil de longue portée, à faible débit et à faible consommation énergétique et peut également être utilisée pour des communications Point-à-Point (P2P). Il s'agit d'une technologie qui module les signaux dans la bande ISM sous 1 GHz en utilisant la technique d'étalement de spectre [59]. Quant à LoRaWAN, celui-ci constitue un protocole de couche liaison de données supérieur au protocole de la couche physique LoRa. Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier ces deux couches avant de présenter une analyse de la performance de la modulation LoRa. Nous sommes basés sur un paramètre essentiel dans le contexte de LoRa à savoir le taux d'erreur binaire (BER) [60].

2.2 La couche physique de LoRa

LoRa est basé sur la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) qui utilise la technique Chirp dont les signaux ont une amplitude constante avec une fréquence variable.

Si la fréquence change du plus bas au plus haut, cela s'appelle up-chirp et si la fréquence change du plus haut au plus bas, nous l'appelons down-chirp. La modulation CSS peut être utilisée pour diffuser des informations sur le spectre assurant ainsi une résistance au bruit sélectif en fréquence, au détriment de l'efficacité spectrale. En utilisant certaines précautions supplémentaires, CSS peut également être plus résistante aux effets de trajets multiples et Doppler par rapport à d'autres modulations plus classiques [61, 62]. Dans LoRa, la fréquence de départ d'un Chirp est utilisée pour représenter un symbole [63] avec un nombre de bits codés qui est ajustable, appelé facteur d'étalement (Spreading Factor : SF). Cela signifie qu'un Chirp utilisant un SF représente 2^{SF} bits par symbole et un symbole est représenté par plusieurs « Chips ». un Chip représente en fait des impulsions d'un code à spectre étalé, tel qu'une séquence de code de pseudo-bruit (PN). L'équation 2.1 donne le lien entre le SF, le Chip et le symbole.

$$SF = \frac{\text{chip rate}}{\text{symbol rate}} \quad (2.1)$$

La modulation CSS permet de répartir l'énergie du signal sur une bande plus large en se basant sur un SF. Etant une largeur de bande de fréquences du signal B , le SF permet de déterminer la durée du symbole T_s comme suit [64] :

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B} \quad (2.2)$$

En supposant que la modulation utilise une B fixe, une augmentation du SF entrainera celle de T_s . L'augmentation du temps de transmission d'un Chirp (temps de symbole) confère au message une plus grande robustesse aux interférences ou au bruit. D'autre part, cet effet peut être partiellement compensé par le fait que, pour des SF plus élevés, le nombre de symboles augmente, ce qui augmente la fréquence des erreurs de symboles.

Un autre inconvénient de la transmission de messages plus longue est la probabilité plus élevée de collisions. On définit aussi une sensibilité du récepteur S calculée selon [64] comme suit :

$$S[dBm] = -174 + 10 \log_{10}(B) + NF + SNR \quad (2.3)$$

Où (-174) représente le bruit thermique du récepteur dans une bande passante de $1Hz$, NF est le facteur de bruit du récepteur (qui est fixé pour une donnée de confi-

guration matérielle) et SNR est le rapport signal sur bruit requis pour la modulation. Selon [64], le débit binaire de données R_b peut être exprimé comme suit :

$$R_b = SF \times \frac{B}{2^{SF}} \quad (2.4)$$

Le Tableau 2.1 illustre le lien entre le débit binaire de LoRa, la durée des symboles et la sensibilité au SF [65].

TABLE 2.1 – Débits, durées des symboles et sensibilité de LoRa en fonction de SF [65].

Mode	Débit (b/s)	Durées des symboles (ms)	Sensibilité (dBm)
LoRa SF 12	293	682	-139.5
LoRa SF 11	537	365	-136.5
LoRa SF 10	976	204	-134
LoRa SF 9	1757	113	-131.5
LoRa SF 8	3125	64	-129
LoRa SF 7	5468	36	-126.5

Il est clair à travers le Tableau 2.1 que le facteur S du récepteur LoRa est affecté par l'augmentation du SF : lorsque le SF augmente, la sensibilité augmente, ce qui permet au récepteur de récupérer les données malgré un faible niveau de SNR. Il est donc recommandé d'utiliser un SF élevé pour pouvoir récupérer le signal avec une bonne fiabilité.

2.2.1 Codage de la trame LoRa

LoRa est basé sur la modulation à étalement du spectre avec les mêmes caractéristiques que la modulation par déplacement de fréquence (FSK) à faible consommation, mais il augmente considérablement la portée. En plus de la modulation elle-même, LoRa applique une série de codages avant la modulation et la transmission. Le principe de cette série de codages est illustré par la Figure 2.1 [60].

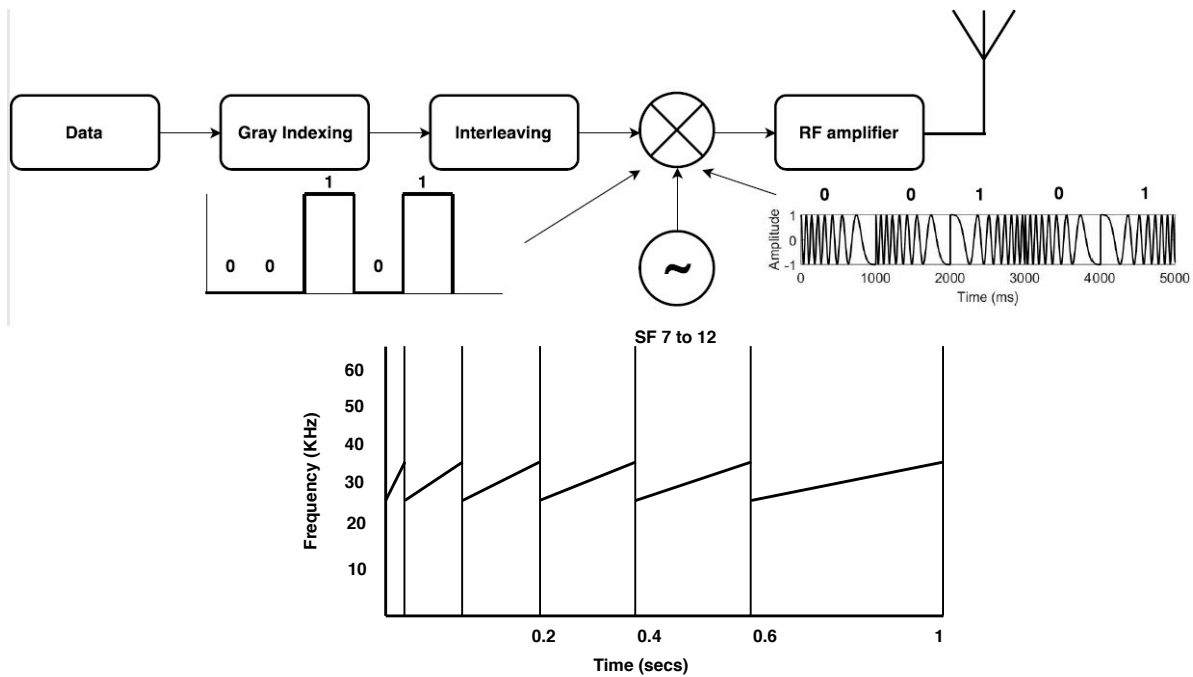


FIGURE 2.1 – Schéma de modulation LoRa [60].

Nous décrivons dans ce qui suit le schéma de modulation LoRa [63] :

- (a) Correction d’erreur directe (FEC) : LoRa utilise le codage de Hamming pour la correction d’erreurs directe. Il s’agit d’un algorithme de code de bloc linéaire simple et facile à mettre en œuvre. La longueur de la partie information de code est sur 4 bits et celle des bits de contrôle varie entre 5 et 8 bits. LoRa propose quatre taux de codage (CR) avec des capacités de correction et de détection d’erreur différentes comme le montre le Tableau 2.2 [66].

TABLE 2.2 – Correction d’erreur et capacités de détection de LoRa [66].

Taux de codage	Correction d’erreur (bits)	Détection d’erreur (bits)
4/5	0	0
4/6	0	1
4/7	1	2
4/8	1	3

La correction d’erreurs n’est introduite que par le débit de code 4/7. De plus, le débit de code 4/8 n’améliore pas les capacités de correction d’erreur, mais seulement les capacités de détection. Le taux de codage 4/5 n’offre aucun avantage

évident par rapport à l'absence de codage, et le taux de codage 4/6 n'augmente que le nombre de bits erronés détectés, mais aucune correction n'est améliorée. Par conséquent, pour disposer de capacités de correction d'erreur réelles, il est recommandé d'utiliser au moins le taux de codage 4/7. Cependant, l'introduction du codage et l'utilisation du taux de codage 4/7 augmentent la longueur de la charge utile de 75% par rapport à l'absence de codage.

- (b) Blanchiment des données¹ : afin de fournir plus de fonctionnalités pour la récupération d'horloge par le récepteur, un blanchiment de données est appliqué en introduisant un caractère aléatoire dans les symboles. Le blanchiment des données permet également de distribuer des informations sur toute la bande passante du canal radio. Les symboles reçus peuvent être « dé-blanchis » en les multipliant (XOR) avec la même séquence de blanchiment utilisée par l'émetteur.
- (c) Entrelacement² : l'entrelacement est une technique qui brouille les bits de données tout au long du paquet. Il est associé à FEC pour rendre les données plus résistantes aux interférences. LoRa implémente un entrelaceur diagonal qui consiste à inverser les deux bits les plus significatifs. Chaque mot diagonal est pivoté d'un nombre arbitraire de bits. Enfin, les bits dans chaque mot de code sont inversés.
- (d) Indexage de Gray³ : l'indexage de Gray est utilisé pour faire correspondre un bloc de SF bits dans M symboles de la constellation, tout en garantissant que deux symboles adjacents ne diffèrent que d'un seul bit au maximum, afin d'augmenter les chances de détection et de correction d'éventuelles erreurs.

LoRa utilise un schéma de correction d'erreur variable qui améliore la robustesse du signal transmis. Le débit de données exprimé par l'équation 2.4 devient ainsi : [64] :

$$R_b = SF \times \frac{B}{2^{SF}} \times \frac{4}{4 + CR} \quad (2.5)$$

où CR est le taux de codage, $CR \in \{1, 2, 3, 4\}$.

- (e) Orthogonalité des SFs : une caractéristique très puissante de la modulation LoRa est que les SF sont pseudo-orthogonaux. Cela permet à un récepteur de détecter correctement un paquet utilisant le SF i même si celui-ci se chevauche dans le

1. **Data Whitening.**
2. **Interleaving.**
3. **Gray Indexing.**

temps avec une autre transmission utilisant un SF j , avec $i \neq j$ et un rapport signal à interférence plus bruit (SINR) du paquet reçu est supérieur à un certain seuil qui dépend à la fois de i et de j . Cette pseudo-orthogonalité entre différents paquets permet à un réseau LoRa d'exploiter différents SF pour atteindre un débit plus élevé par rapport aux systèmes de modulation classiques.

2.3 La couche de liaison de LoRa : LoRaWAN

LoRaWAN est une architecture standard ouverte développée par LoRa Alliance [67] afin de fournir un mécanisme de contrôle d'accès au support et de permettre aux terminaux de communiquer avec une ou plusieurs passerelles. Il utilise une topologie réseau en étoile, dans laquelle une passerelle relaie de manière transparente les messages entre le serveur de réseau et le terminal, comme illustré à la Figure 2.2. Les terminaux utilisent LoRa pour communiquer avec des passerelles reliées au serveur par un réseau IP (cablé, 3G, WiFi, etc.). La communication entre les terminaux et les passerelles est répartie sur différents canaux de fréquence et les débits de données sont déterminés en fonction de la portée et de la durée du message. Cette sélection peut être gérée par une infrastructure de réseau LoRaWAN, qui sélectionne le débit de données et le canal pour chaque terminal à l'aide d'un algorithme ADR (Adaptive Data Rate) [67]. Cet algorithme est une technique utilisée pour économiser de l'énergie et augmenter la portée. L'algorithme ADR peut augmenter le SF dont la marge SNR est trop faible ou le diminuer si les transmissions des terminaux sont constamment supérieures à la sensibilité. L'ADR est obtenu en adoptant différents SF orthogonaux et puissances de transmission. Il est possible que le débit de données varie jusqu'à 9 kb/s en fonction du SF. Cependant, l'augmentation du débit de données augmente également le risque de perte du message en raison d'interférences et de collisions. Si le service de réseau n'administre pas l'ADR, le terminal choisira un SF supérieur après chaque liaison montante répétée jusqu'à ce qu'un accusé de réception soit reçu [68].

Un réseau LoRaWAN comprend les éléments suivants :

- (a) Terminal : il peut être n'importe quel équipement qui envoie ou reçoit des informations. Il n'existe pas de définition réelle d'un terminal, mais cela fait généralement référence aux capteurs, détecteurs et actionneurs, où la détection et le contrôle ont lieu.

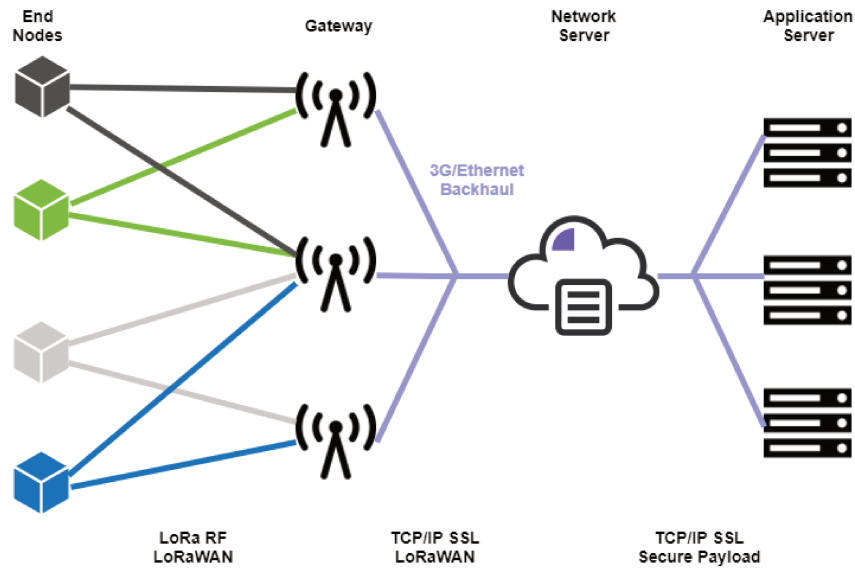


FIGURE 2.2 – Architecture d'un réseau LoRa [60].

- (b) Passerelle : également appelée modem ou point d'accès. Elle est utilisée pour transférer des messages de / vers les terminaux et le serveur. Avec LoRaWAN, les terminaux ne sont pas liés à la passerelle. De ce fait, tout message d'un terminal reçu par la passerelle sera remis au serveur.
- (c) Serveur de réseau : c'est la partie la plus intelligente du réseau LoRaWAN dont les principales fonctionnalités sont :
- surveillance de la passerelle et des terminaux ;
 - agrégation les données entrantes ;
 - routage / transfert des messages entrants vers le correspondant serveur d'application ;
 - suppression des redondances, notamment les messages en double reçus d'un terminal par l'intermédiaire de plusieurs passerelles ;
 - sélection d'une passerelle basée sur la Puissance du signal reçu (RSS) plus élevée dans le cas de la liaison descendante ;
 - envoi des messages tampon en liaison descendante, utilisé pour stocker les messages de la liaison descendante jusqu'à ce que le terminal prévu se réveille.

- (d) Serveur d'application : il représente l'application pour un développeur ou un fabricant qui souhaite analyser les messages reçus d'un terminal. Par exemple, fonctionnement d'un climatiseur dans une plage de température pré-définie.

2.3.1 Les Communications LoRaWAN

Les spécifications de LoRaWAN définissent trois classes pour de terminaux, comme illustré à la Figure 2.3 [69]. Ces classes ont des capacités différentes pour couvrir une diversité d'applications. Chaque classe assure un compromis entre la durée de vie de la batterie et la latence des communications. En fonction des exigences, un terminal peut basculer entre les classes, mais la Classe A doit être implémentée sur tous les terminaux, par défaut.

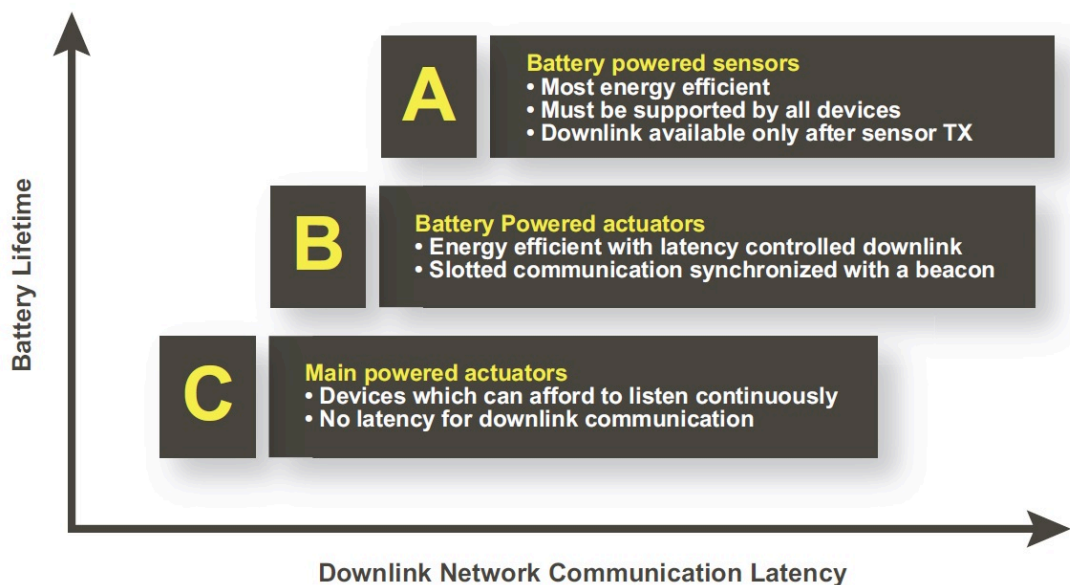


FIGURE 2.3 – Classes des terminaux LoRaWAN [69].

- (a) Les classes se différencient par les aspects suivants :
- Classe A (terminaux bidirectionnels) : il s'agit de la classe la plus économe en énergie, où un terminal reste la plupart du temps en mode veille. Après chaque phase de liaison montante, il existe deux fenêtres de liaison descendante, RX1 et RX2 (Figure 2.4). Ces deux fenêtres permettent de recevoir des données avec une latence d'environ une seconde. En plus, les

terminaux de cette classe envoient des trames d'une façon cyclique [67], on définira par « T » ce cycle.

- Classe B (terminaux bidirectionnels avec créneaux de réception programmés) : identique à la Classe A, avec l'écoute des messages entrants à des intervalles réguliers synchronisés avec une balise (Figure 2.5).
- Classe C (terminaux bidirectionnels avec intervalles de réception maximaux) : dans cette classe, les terminaux écoutent en permanence les messages entrants (Figure 2.6), excepté le cas où ils sont en train d'émettre (pas de latence). Cette classe est utilisée pour les applications en temps réel, où l'énergie n'est pas limitée.

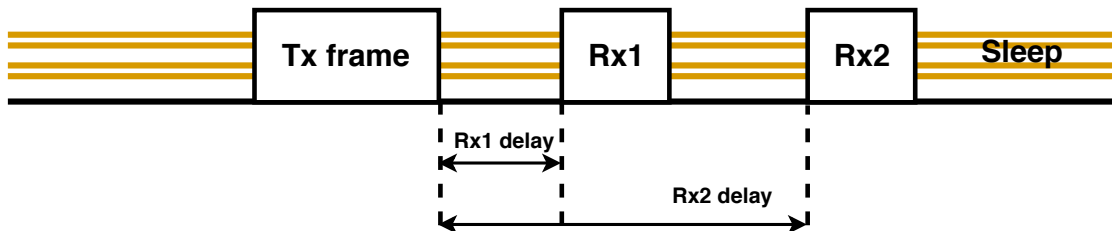


FIGURE 2.4 – Fenêtres de la Classe A.

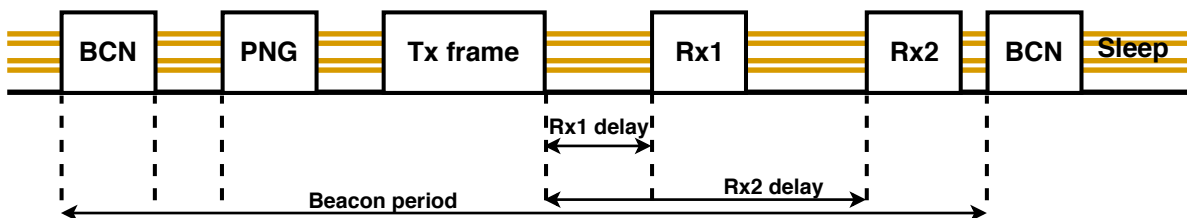


FIGURE 2.5 – Fenêtres de la Classe B.

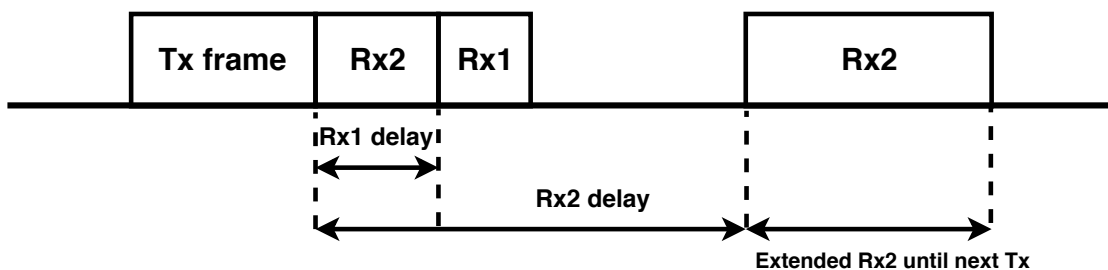


FIGURE 2.6 – Fenêtres de la Classe C.

(b) L'établissement de connexion avec sécurité : LoRaWAN assure la sécurité et l'intégrité des messages de la liaison montante et descendante entre le terminal et la passerelle. Il préserve aussi le temps du serveur pour la lecture du contenu des messages destinés un autre réseau ou infrastructure. Pour ce faire, LoRaWAN définit deux clés différentes utilisées lors de l'échange de messages habituel :

- La clé de session réseau (Network session key : NwkSKey) : elle est utilisée pour chiffrer la trame entière (en-têtes + charge utile (payload)) dans le cas où une commande MAC est envoyée. Lorsque les données sont envoyées, cette clé est utilisée pour signer le message, ce qui permet au serveur de réseau de vérifier l'identité de l'expéditeur.
- La clé de session d'application (Application Session Key : AppSKey) : elle est utilisée pour chiffrer la charge utile dans la trame et elle n'a pas besoin d'être connue du serveur de réseau. Le serveur d'application déchiffre l'information en utilisant la même clé.

(c) Rejoindre le réseau : un terminal ne peut rejoindre le réseau LoRaWAN que s'il a été activé et pour ce faire, trois types d'informations sont nécessaires :

- Adresse du terminal (Device Address : DevAddr) : elle consiste en un identifiant de 32 bits unique sur le réseau. et elle est équivalente à une adresse IP sur un réseau TCP/IP. Elle est présente dans chaque trame de données. Cette adresse est partagée entre le terminal, le serveur de réseau et le serveur d'application.
- Clé de session réseau (Network Session Key : NwkSKey) : utilisée ici comme clé de chiffrement AES 128 bits unique par serveur de réseau. NwkSKey est partagée entre le terminal et le serveur de réseau et elle est utilisée pour assurer l'intégrité du message et la sécurité de la communication.
- La clé de session d'application (AppSKey) : utilisée ici comme clé de chiffrement AES 128 bits unique par serveur d'application. AppSKey est partagée entre le terminal et le serveur d'application. Elle est utilisée pour chiffrer et déchiffrer les messages de données d'application et fournir une sécurité pour la charge utile de l'application.

Dans les deux méthodes, l'ID unique du terminal (DevEUI, adresse 64 bits équivalente à une adresse MAC) doit être connu du serveur avant l'activation selon deux schémas :

- Activation par personnalisation (Activation By Personalization : ABP) : les clés partagées sont stockées dans le terminal lui permettant ainsi d'initier directement la communication. Par contre, ce type d'activation ne permet pas l'itinérance entre différents fournisseurs de réseau.
 - over the Air Activation (oTAA) : un terminal exécute une procédure de jonction pour se connecter à un réseau LoRaWAN et échanger des données. Dans cette procédure, le terminal échange deux messages MAC avec le serveur : demande de jonction et acceptation de la jonction. Pendant la procédure de jonction, une adresse de terminal dynamique (DevAddr) est attribuée au terminal et des clés de sécurité sont négociées avec lui. Cette procédure est répétée chaque fois que le terminal perd la connexion. De cette manière, un terminal peut se déplacer entre les réseaux LoRaWAN de différents opérateurs.
- (d) Communication : après activation, le terminal rejoint le réseau LoRaWAN et commence à envoyer/recevoir des messages de données. Ces messages sont utilisés pour transférer les commandes MAC et les données d'application, qui peuvent être combinées dans un seul message. LoRaWAN permet à un terminal d'utiliser n'importe quel débit de données possible pour transmettre le message en utilisant l'algorithme ADR décrit dans la Section 2.3. Le terminal et le serveur d'application peuvent demander une confirmation de la bonne réception du message. Les messages de données confirmées doivent être acquittés par le destinataire, tandis que les données non confirmées ne nécessitent pas d'accusé de réception. Enfin, les messages de la liaison descendante au niveau de la couche physique sont similaires aux messages de la liaison montante, mais sans le champ CRC, ce qui signifie qu'il n'y a pas de contrôle d'intégrité de la charge utile. Le message doit être aussi court que possible pour garantir un impact minimal sur les limites du rapport cyclique (Duty Cycle) de la bande ISM utilisée.

2.3.2 Fonctionnement du protocole LoRaWAN

Le protocole LoRaWAN distingue entre les messages de la liaison montante et ceux de la liaison descendante. Les messages de la liaison montante sont envoyés par les terminaux au serveur de réseau et sont relayés par une ou plusieurs passerelles et

ceux de la liaison descendante sont envoyés par le serveur de réseau à un seul terminal et sont relayés par une seule passerelle [70]. Les Figures 2.7 et ?? illustrent les diagrammes de flux pour les Classes A et B. Pour la Classe A, la transmission de paquets sur la liaison montante commence de manière totalement asynchrone. Après chaque transmission montante, le terminal ouvre deux courtes fenêtres de réception. Tandis que pour la Classe B, la transmission de paquets sur la liaison montante commence de manière synchrone. Toutes les passerelles doivent diffuser de manière synchrone une balise fournissant une référence de synchronisation aux terminaux. Ensuite, les terminaux peuvent ouvrir périodiquement des fenêtres de réception appelées "ping slots", qui peuvent être utilisées par l'infrastructure de réseau pour établir une communication en liaison descendante. Un réseau initie une liaison descendante à l'aide de l'un de de "ping slots". Le choix de la passerelle en liaison descendante est sélectionnée par le serveur sur la base des indicateurs de qualité du signal de la dernière liaison montante du terminal. Après chaque transmission en liaison montante, le terminal ouvre deux fenêtres de réception courtes, comme dans la Classe A. Pour les deux Classes A et B, la première fenêtre RX1 utilise la même fréquence et le même débit de données que la liaison montante. Tandis que la deuxième fenêtre RX2 utilise un canal et un débit de données prédéfinis. Il est possible de les modifier par des commandes MAC. La longueur d'une fenêtre de réception doit être au moins égale au temps requis par l'émetteur-récepteur radio des terminaux pour détecter efficacement une balise de liaison descendante [5].

Ils existent certains seuils de sensibilité pour que la passerelle puisse décoder le signal. Ces seuils sont présentés dans le Tableau 2.1 en fonction du SF, débit et la durée de symbole [65]. Ce tableau illustre le seuil de sensibilité S_i utilisé par la passerelle pour les paquets entrants qui proviennent du terminal utilisant différents SF. N'importe quel paquet au-dessous de S_i ne sera pas détecté par la passerelle et sera considéré comme un paquet perdu ou rejeté. Citons un exemple où un paquet est arrivé à la passerelle en utilisant SF = 7 avec une sensibilité de -132,5 dBm, dans ce cas, la passerelle ne verrouille pas le signal entrant et ne le décode pas. Notons que, la différence entre un paquet rejeté et un paquet erroné est que le dernier est reçu et traité par la passerelle contrairement au paquet rejeté.

La technologie LoRa en est encore à ses débuts. Elle devra attendre la maturité

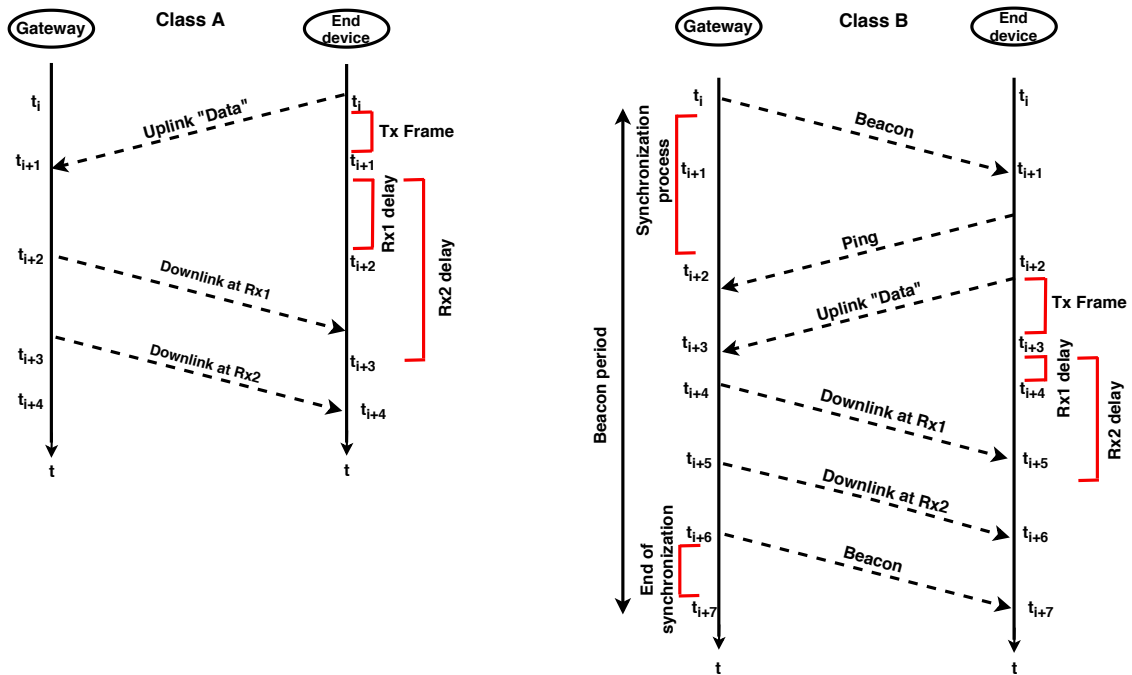


FIGURE 2.7 – Diagrammes de séquence pour les classes A et B.

dans les années à venir, en ajoutant des améliorations en matière de nouvelles fonctionnalités (itinérance, localisation, sécurisation,...), de qualité de service (QoS), d'optimisations inter-couches (cross-layer optimizations), d'options MAC améliorées et de coordination inter-réseaux.

2.4 Étude analytique et simulation du taux d'erreur binaire pour LoRa

2.4.1 État de l'art des simulateurs LoRa

Actuellement, il existe plusieurs simulateurs utilisés pour effectuer des expériences reproductibles pour différents systèmes, permettant de tenir compte de l'impact de tous les paramètres sur leurs performances globales. Ces simulateurs sont utiles pour déterminer les performances globales d'un système ou d'un réseau quand aucun benchmark à grande échelle n'est disponible. Cette approche est généralement utilisée pour des réseaux avec des scénarios empiriques et des conditions difficiles, telles qu'un grand nombre de terminaux ou des charges de trafic élevées. Etant donné que le Lo-

RaWAN est classé dans cette catégorie de réseau, la majorité des études dont il a fait l'objet ont utilisées des simulateurs. À travers leurs simulations, les auteurs tiennent en compte les différentes caractéristiques de la couche physique LoRa ainsi que du comportement du LoRaWAN. NS3 est l'un des simulateurs de réseau le plus utilisé qui est en fait compatible avec un certain nombre de simulateurs LoRaWAN [71], [72], [73]. D'autres simulateurs existent, mais la plupart sont implémentés en Python [74] et C++ [75] mais ils ne sont ni disponibles publiquement ni open source. Dans ce qui suit, nous citerons quelques une de ces études avant de présenter notre travail portant sur le calcul de la probabilité d'erreur (Taux d'Erreur Binaire (BER)) de la modulation LoRa qui a fait l'objet d'une conférence internationale [60].

Dans [74], les auteurs ont utilisés un simulateur « LoRaSim » pour évaluer les performances de LoRaWAN. Bien que ce simulateur possède l'avantage d'être simple d'utilisation, il présente certains inconvénients. Premièrement, la propriété de collision est uniquement basée sur la différence moyenne de RSSI et le temps relatif entre les transmissions, sans tenir compte des valeurs de SNR entre les transmissions. De plus, les signaux reçus avec différents SF sont considérés comme purement orthogonaux, ce qui n'est pas vrai dans certaines conditions de niveau de puissance. Les paramètres du terminal (SF et puissance d'émission) peuvent être ajustés en fonction de la distance de la passerelle et offrent la possibilité de gérer des réseaux avec plusieurs passerelles. Par ailleurs, LoRaSim n'implémente aucune possibilité de trafic avec accusé de réception (ACK) ou de liaison descendante. Une version étendue de LoRaSim avec prise en charge de la liaison descendante a été présentée dans [76].

Une autre étude a été réalisée dans [77] afin de déterminer le seuil du rapport signal sur interférence (SIR) auquel un signal peut être correctement décodé sous une interférence inter-SF. L'étude est basée sur des simulations MATLAB ainsi que sur des mesures de nœuds réels du SIR. Sur la base des résultats obtenus, les auteurs ont proposé une extension du simulateur LoRaSim pour recevoir les deux paquets dans des conditions de bruit inter-SF uniquement lorsque les différences entre RSSI sont inférieures à un certain seuil (dans ce cas 6 dB). Leur extension permet également de prendre en compte les évanouissements de canal.

Un nouveau simulateur a été proposé dans [73] offrant la possibilité d'utiliser des

commandes MAC, des collisions basées sur des interférences entre différents SF. Ce simulateur permet également de prendre en charge de la réception des paquets par multi-passerelles. Cependant il n'est pas en mesure de gérer le trafic en liaison descendante et les accusés de réception en liaison montante.

Un simulateur pour la couche physique est proposé dans [71] basé sur un modèle d'erreur LoRa PHY qui est déterminé à l'aide d'un ensemble complet de simulations de la couche physique dans MATLAB. Ce modèle a l'avantage de prendre en compte le bruit causé par d'autres signaux utilisant différents SF sur le même canal en calculant les valeurs SNR instantanées. Contrairement au modèle de la couche physique proposé dans [72] qui considère uniquement le niveau de puissance reçu des transmissions simultanées et non l'impact de bruit global. Cependant, ce modèle a l'inconvénient de ne pas reproduire la vraie estimation de l'interférence et de l'impact de collision dans le réseau. Dans [71], les réseaux multi-passerelles peuvent être simulés avec prise en compte du trafic de liaison descendante, ainsi que le trafic confirmé de liaison descendante/montante. De plus, différentes techniques d'assignation SF peuvent être utilisées : aléatoire, fixe ou basée sur le PER. Cependant, l'inconvénient de ce simulateur est qu'aucune commande MAC n'est implémentée. Mais cela n'aura pas d'impact sur l'évaluation de la performance de LoRaWAN, dans le cas où l'impact de l'ADR ne soit évalué. En revanche, les commandes MAC sont prises en compte par le simulateur proposé dans [72] avec quelques petits flux de plus dans la mise en œuvre qui diffèrent de la norme. Par exemple, le MAC côté réseau est implémenté dans la passerelle et non dans le serveur de réseau ; le terminal attendra un temps aléatoire avant la transmission (cela ne fait pas un véritable Aloha) et au niveau de la passerelle, le trafic de liaison descendante est retardé pour la prochaine fenêtre RX si le trafic de liaison montante est reçu. Afin de corriger les failles des simulateurs présentes précédemment, il serait souhaitable que LoRa Alliance réalise et publie un simulateur de la technologie LoRa regroupant toutes les caractéristiques de la couche physique et la couche MAC.

Nous présentons dans la suite de cette section une analyse des performances de la modulation LoRa en termes de BER et sa simulation sous MATLAB. Nous avons exploité le travail qui a été présenté dans [78] en proposant une optimisation de l'équation qui calcule le BER et en tenant compte de plusieurs paramètres liés à la modulation

LoRa, tels que le SF, la fréquence des symboles, la fréquence d'échantillonnage et le taux de codage.

2.4.2 Etude analytique

Selon [78], l'estimation de l'expression analytique de la probabilité d'erreur de CSS ($P_{e,CSS}$) est donnée par :

$$P_{e,CSS} = Q\left(\frac{\log_{12}(SF) E_b}{\sqrt{2} N_0}\right) \quad (2.6)$$

Où $Q(\cdot)$ et $\frac{E_b}{N_0}$ désignent respectivement la fonction d'erreur et le rapport de densité spectrale énergie par bit à la puissance de bruit. Cette équation montre que, pour un SF plus élevé, le BER est plus important. L'utilisation de $\frac{E_b}{N_0}$ ne reflète pas le cas idéal, car en CSS, l'énergie est répartie sur une large bande et dépend de plusieurs paramètres qui varient d'un système à l'autre. Le problème est lié à la conversion de $\frac{E_c}{N_0}$ en $\frac{E_b}{N_0}$. Où $\frac{E_c}{N_0}$ est le rapport de densité spectrale d'énergie par « chip » sur bruit. Selon [79], $\frac{E_c}{N_0}$ est donné par :

$$\frac{E_c}{N_0} \text{ [dB]} = \frac{E_b}{N_0} \text{ [dB]} + 10 \log_{10}\left(\frac{R_c M_0}{SF}\right) + L \text{ [dB]}, \quad (2.7)$$

où R_c , M_0 , SF et L désignent le débit de code FEC, l'ordre de modulation en bits/sym (notez que $M_0 = 1$ pour toutes les applications à spectre étalé), le facteur d'étalement et l'affaiblissement supplémentaire lié à la mise en oeuvre, respectivement.

On remarque que dans le CSS, le chip représente le symbole multiplié par 2^{SF} (équation 2.1), donc l'énergie par chip est égale à l'énergie par symbole multipliée par 2^{SF} ($\frac{E_c}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} \times 2^{SF}$), où $\frac{E_s}{N_0}$ désigne l'énergie par symbole. L'expression analytique de $\frac{E_s}{N_0}$ est donnée par :

$$\frac{E_s}{N_0} = 10 \log_{10}\left(\frac{f_{sym}}{f_{samp}}\right) + SNR \quad (2.8)$$

où f_{sym} , f_{samp} et SNR désignent respectivement la fréquence des symboles, la fréquence d'échantillonnage et le rapport signal sur bruit. Donc,

$$\frac{E_c}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} \times 2^{SF} = \left[10 \log_{10}\left(\frac{f_{sym}}{f_{samp}}\right) + SNR\right] \times 2^{SF}, \quad (2.9)$$

À partir de l'équation 2.7 et 2.9, nous obtenons 2.10.

$$\frac{E_b}{N_0} = \left[10 \log_{10} \left(\frac{f_{sym}}{f_{samp}} \right) + SNR \right] \times 2^{SF} - 10 \log_{10} \left(\frac{R_c M_0}{SF} \right) - L. \quad (2.10)$$

À partir de l'équation 2.6 et 2.10, et après la conversion de dB en linéaire, nous obtenons $P_{e,CSS}$ (11).

$$P_{e,CSS} = Q \left(\frac{\log_{12}(SF)}{\sqrt{2}} \times \left[10^{SNR/10} \times \left(\frac{f_{sym}}{f_{samp}} \right) \right] \times \left(\frac{2^{SF}}{CR \times M_0 \times SF \times 10^{L/10}} \right) \right). \quad (2.11)$$

Contrairement à l'équation 2.6 initiale proposé dans [78] qui ne dépend que du SF et du $\frac{E_b}{N_0}$, l'équation finale 2.11 que nous proposons montre bien que $P_{e,CSS}$ dépend de f_{sym} , f_{samp} , CR , SF , L et SNR . L'utilisation de ces paramètres est plus précise, car ils ne dépendent pas linéairement de $\frac{E_b}{N_0}$ (c'est-à-dire que la fréquence des symboles, la fréquence d'échantillonnage et la perte d'implémentation varient d'un système à l'autre).

2.4.3 Simulations et résultats

Pour valider notre analyse, nous avons implémenté dans un premier temps notre propre simulateur sous MATLAB, prenant en compte des fonctionnalités de base de LoRa. Ensuite, nous avons simulé le paramètre BER lié à la transmission LoRa, en utilisant trois SFs différents et avec 2000 itérations Monte-Carlo. Le canal du bruit additif blanc gaussien (AWGN) est pris en compte dans le modèle. Tous les paramètres des simulations sont donnés dans le Tableau 2.3.

TABLE 2.3 – Paramètres de simulation du BER.

Taux de codage	4/8
SF	7-9-11
Taille de paquet	243 octets
Bande passante	125 KHz
f_{samp}	250 KHz
SNR [dB]	[-35 :0]

Nous considérons la liaison montante dans la simulation car les données des réseaux de capteurs circulent généralement de manière ascendante. On a choisi un

intervalle de SNR allant de $-35dB$ jusqu'au $0dB$ pour tester les performances de la modulation CSS de LoRa dans des conditions empiriques. Les données sont modélisées sous forme de paquets de 243 octets (longueur maximale de la charge utile à transmettre dans le message LoRa [80]).

La Figure 2.8 montre les résultats de simulations du BER pour les transmissions LoRa à l'aide de trois SFs (7, 9 et 11). Les résultats sont appropriés avec l'équation 2.11 car, lorsque SF diminue, le $P_{e,CSS}$ diminue. Avec un $SNR = -15dB$, il est d'environ 5.10^{-2} avec $SF = 11$, alors que le BER devient $10^{-0.8}$ avec $SF = 7$.

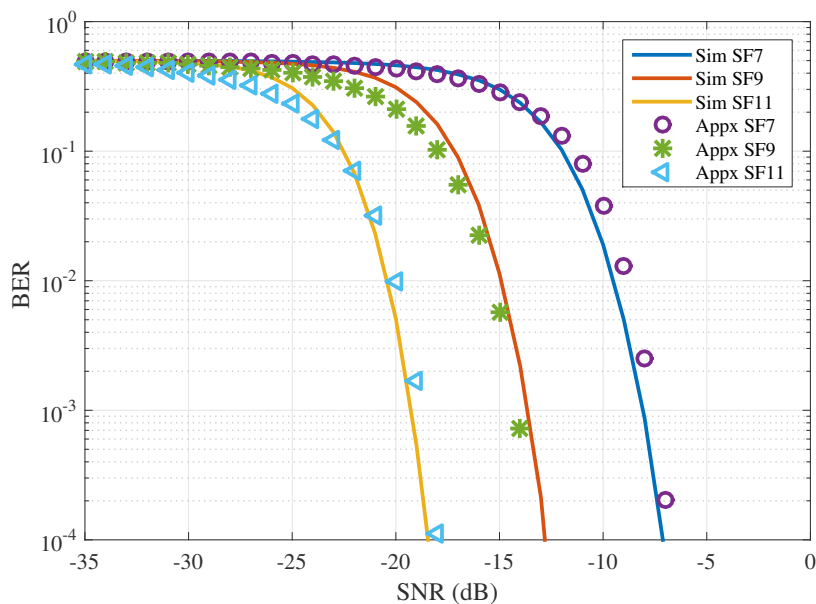


FIGURE 2.8 – BER pour les transmissions LoRa.

La Figure 2.9 montre les résultats de simulations du BER de LoRa SF 7 en utilisant deux taux de codage différents ($CR = \frac{4}{5}, \frac{4}{8}$). Il est bien clair que le BER diminue avec le taux de codage, à $SNR = -10dB$, le BER est d'environ 2.10^{-2} avec $CR = \frac{4}{8}$, tandis que le BER devient égal à $1, 5.10^{-1}$ avec $CR = \frac{4}{5}$.

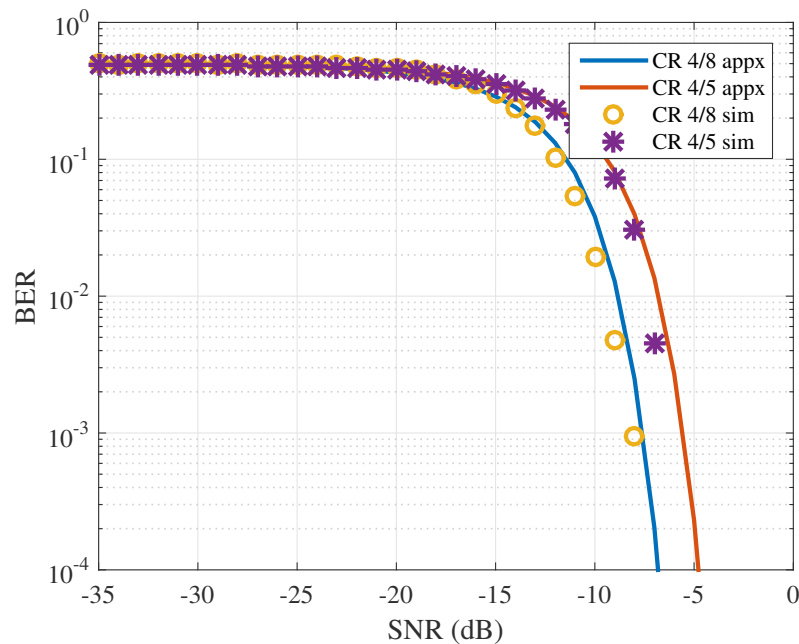


FIGURE 2.9 – Approximation et simulation du BER pour LoRa avec $SF = 7$, $CR = \frac{4}{5}, \frac{4}{8}$.

À travers les résultats obtenus, nous constatons qu'un faible CR permet de diminuer le BER. Cependant, cela se traduit par un impact sur le BER du système LoRa. Pour conclure et vu la cohérence des courbes de simulations obtenues avec l'équation analytique utilisée pour le calcul de BER, nous pouvons valider ainsi notre simulateur LoRa. En effet, ce simulateur sera utilisé pour l'évaluation des performances du protocole proposé dans le chapitre 4 en lui ajoutant la problématique des interférences.

2.5 Réalisation de démonstrateurs

Le développement de nouveaux services de Villes Intelligentes et la sensibilisation des acteurs locaux (élus et adjoints) passent par la mise en place de démonstrateur. Dans le cadre de la présente thèse, au sein de SPIE et avec les étudiants de la 4^{ème} année de Polytech Nantes (département ETN⁴), deux démonstrateurs ont été développés et détaillés ci-dessous.

4. **Electronique et Technologies Numeriques.**

2.5.1 Démonstrateur pour Ville Intelligente

Dans la thématique des villes intelligentes et pour montrer aux collectivités l'intérêt d'investir sur les IoT, et avec la cellule « Smart City » chez SPIE, un banc d'essai technique a été réalisé permettant l'agrégation de plusieurs services dédiés à la ville, avec le développement des programmes de communication permettant les échanges entre les capteurs et les passerelles. Le but est de rassembler les différents capteurs sur une même interface de gestion quel que soit le fournisseur et de démontrer la faisabilité de l'interopérabilité de l'infrastructure LoRa et ces possibilités en termes d'applications. Pour cela, un cahier des charges a été défini, incluant les attentes et les besoins en ressources matérielles pour la conception du démonstrateur.

Dans un premier temps, les besoins des collectivités en termes des services ont été identifiés. Quatre catégories sont visibles et clairement identifiables sur le support : parking intelligent, environnement intelligent, gestion intelligente des déchets et éclairage intelligent. Dans un deuxième temps, le choix a été fait pour connecter les capteurs parmi une multitude de choix de technologies radio comme Sigfox, NB-IoT et LoRa.

La technologie LoRa a été choisie pour trois raisons :

- LoRa permet de créer un réseau privé sans passer par les réseaux d'opérateurs. En effet, les collectivités ne souhaitent pas que leurs données circulent sur un réseau externe ;
- le protocole LoRaWAN du LoRa est « Open Source », pouvant être exploré et modifié selon les besoins ;
- le protocole LoRaWAN permet la liberté de choisir ou développer le serveur de réseau et le serveur d'applications, contrairement aux autres technologies propriétaires, source de valeur ajoutée pour l'entreprise (chaîne de valeur).

La Figure 2.10 illustre le démonstrateur pour Ville Intelligente, composé de capteurs pour les quatre services proposés, d'une passerelle LoRa pour récupérer les données des capteurs, d'un micro-serveur pour gérer la connectivité entre la passerelle et la base de données, d'une micro base de données pour enregistrer les relevés de capteurs et un portail Web pour récupérer les relevés de ces capteurs.



FIGURE 2.10 – Démonstrateur pour Ville Intelligente.

Dans le cadre de la collaboration SPIE-Polytech Nantes, le travail de la présente thèse a consisté également à encadrer un groupe des étudiants ETN en 4ème année à réaliser pour les clients de SPIE une application mobile Android pour ce démonstrateur, comme sujet de leur projet transversal. La Figure 2.11 présente la page d'accueil développée par les étudiants, avec l'accès rapide aux données les plus importantes des capteurs actualisées en temps réel. Cette page permet le choix du type de données à afficher par capteur :

1. environnement intelligent : la température, la pollution (le taux des particules fines dans l'air (PM1 / PM2.5 / PM10), l'humidité, la pression atmosphérique et le niveau du bruit ;
2. gestion intelligente des déchets : le volume des déchets, la capacité restante et l'estimation du poids ;
3. parking intelligent : les places restantes, le temps d'occupation et le niveau de batterie des capteurs ;
4. éclairage intelligent : le temps d'éclairage.

Il est possible de passer à la carte géographique ou aux données plus détaillées pour chacun des capteurs en affichant les courbes sur plusieurs intervalles de temps

comme montre la Figure 2.12 pour le capteur d'environnement, il est possible de voir les différents relevés obtenus en fonction de : journée, mois et année.

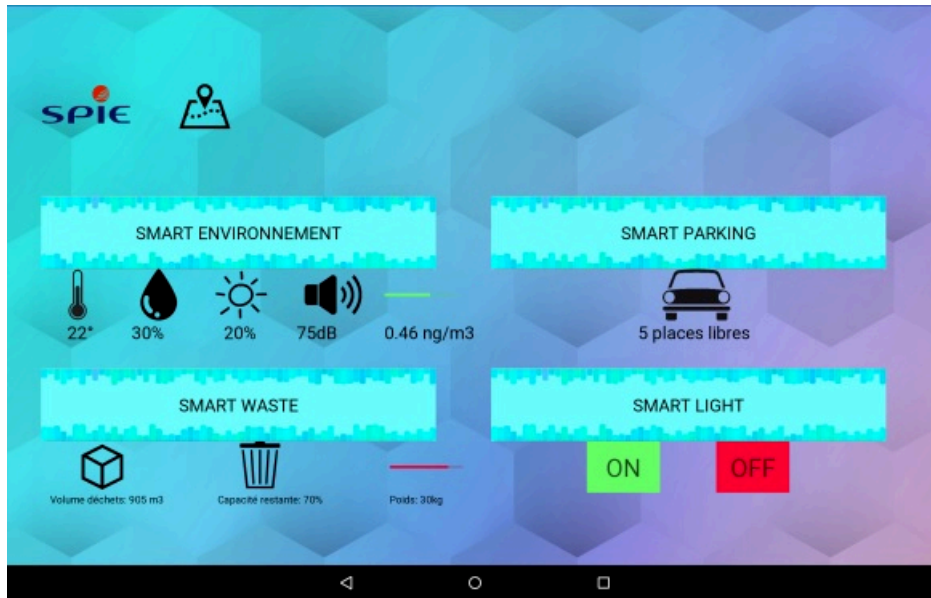


FIGURE 2.11 – Page d'accueil de l'application mobile du démonstrateur pour Ville Intelligente.

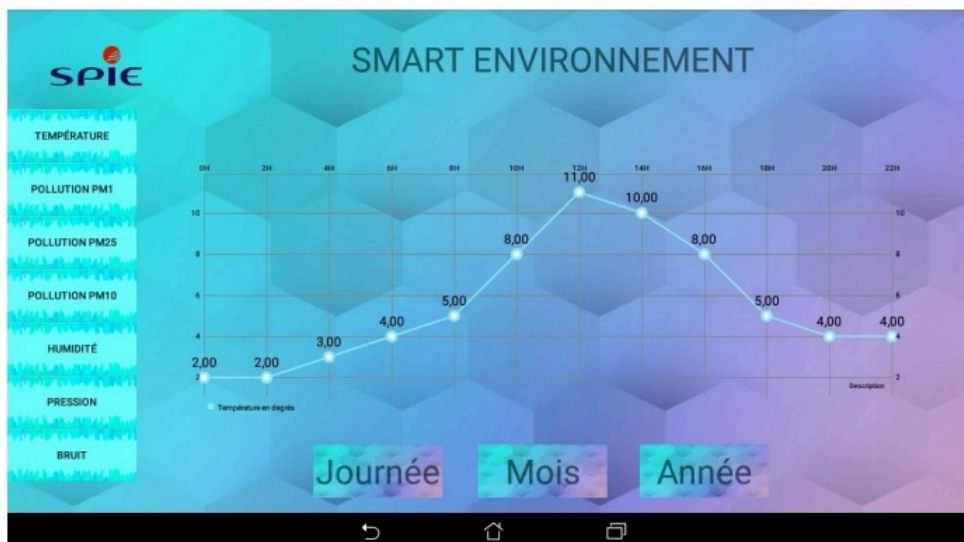


FIGURE 2.12 – Page du capteur d'environnement.

Ce travail a intégré le démonstrateur ayant permis de compléter sa mise au point et de valoriser l'exploitation des données.

2.5.2 Démonstrateur d'abri-bus connecté

Dans le cadre de l'accompagnement vers la transition numérique du territoire, et de la mise en place de l'optimisation des services urbains via l'intelligence numérique, SPIE, La Roche-sur-Yon Agglomération et l'Université de Nantes ont signé une convention pour réaliser un démonstrateur d'abri-bus connecté sur le campus universitaire de la courtaisière sur la période 2018-2021. L'Abri-Bus-Connecté permettra de disposer d'un support pour développer des solutions innovantes d'accès aux informations de la ville en haut débit, de tester des capteurs environnementaux et de bénéficier d'un laboratoire pédagogique pour expérimenter les nouveaux usages.

L'agglomération met à disposition l'emplacement de l'arrêt de bus ainsi que la fibre optique. Elle sera également l'administrateur réseau pour actualiser les contenus WiFi et LiFi. De plus, elle s'occupera de réaliser des enquêtes citoyennes afin de déterminer les besoins des usagers. La mission de SPIE est d'intégrer la technologie WiFi et LiFi, d'installer les raccordements électriques, de décoder les trames de données des capteurs ainsi que de mettre en place le serveur de stockage de données. Le projet s'appuie également sur des partenaires externes tels que JCDecaux qui fournira l'au-bette et potentiellement la dalle tactile, ainsi que la SYDEV de la Vendée qui s'occupe des réseaux de transports communs dans l'agglomération ce qui pourra être utile pour le tracking des bus.

Le travail de cette thèse à également consister d'assurer l'encadrement de deux groupes d'étudiants dans le cadre du module "Projet Transversal" de la 4ème année SRT. Le premier groupe était en charge de l'infrastructure réseau de l'abri-bus. Cette infrastructure est composée de : capteurs environnementaux, concentrateur multitech (LoRa, Sigfox, 4G et Wi-Fi 5GHz), micro-serveur, base de données, point d'accès Wi-Fi public et un switch. Le second groupe, quant à lui, avait pour but de créer l'environnement graphique de l'écran tactile. La Figure 2.13 montre la version finale de la maquette réalisée par les étudiants. Cette maquette permet de visualiser les relevés des capteurs environnementaux (la température, la qualité de l'air et le niveau du bruit), les itinéraires de bus passant par l'arrêt avec une cartographie des différentes trajets de bus. En plus, cette maquette fournit des informations concernant les événements et les nouvelles de La Roche sur Yon.



FIGURE 2.13 – Conception d’une maquette pour l’abri-bus.

Cet abri voyageurs fournit un accès haut-débit aux usagers (notamment via les technologies Li-Fi et Wi-Fi) et permettra de recharger son téléphone via des ports USB. Le tout sera alimenté principalement par des énergies renouvelables (solaires et/ou éoliennes). L’abri voyageurs sera donc une vitrine de l’innovation en exposant des services innovants et des avancées technologiques issues de la R&D des entreprises

de la région.

2.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie LoRa à travers ses deux couches physique et MAC. La couche physique offre une large couverture en utilisant l'étalement du spectre, tandis que la couche MAC (LoRaWAN) définit l'architecture de réseau. Nous avons proposé une nouvelle expression d'approximation du taux d'erreur binaires (BER) pour LoRa. Contrairement aux travaux existants dans lesquels le BER n'est fonction que du rapport de densité spectrale de puissance par bit à la puissance de bruit ($\frac{E_b}{N_0}$), notre expression prend en compte d'avantage de paramètres dans le calcul de BER tels que le SF, le taux de codage, la fréquence des symboles et la fréquence d'échantillonnage. Cette expression a été évaluée sous un nouveau simulateur LoRa que nous avons implémenté sous MATLAB. Les résultats obtenus nous ont permis non seulement de valider la nouvelle expression, mais aussi notre simulateur LoRa. Ce simulateur sera utilisé dans le chapitre 4 en intégrant l'apport des interférences. Enfin, nous avons présenté deux projets de SPIE CityNetworks pour les Villes Intelligentes réalisés dans le but de mettre une valeur l'apport des réseaux LoRa dans les Villes Intelligentes.

ÉVALUATION DES COUCHES MAC DES TECHNOLOGIES IOT : LoRa, SIGFOX ET NB-IoT

Dans ce chapitre, nous explorons les fonctionnalités de la couche MAC pour trois technologies LPWAN : LoRa, Sigfox et NB-IoT. Les différences techniques au niveau de la couche MAC entre Sigfox, LoRa et NB-IoT sont exploitées et évaluées en utilisant un modèle basé sur l'utilisation des variables aléatoires et des processus stochastiques pour évaluer la technologie la plus adaptée à nos besoins. Nous utilisons notre simulateur MATLAB pour évaluer les performances en termes de taux d'erreur de paquets.

3.1 Contexte

Les protocoles de réseau LPWAN existants doivent être adaptés pour répondre aux exigences nécessaires des services IoT, en fonction de leurs propres exigences, tels que le débit, la portée, la robustesse, etc. Les protocoles pour les réseaux LPWAN sont en mesure de surmonter les limitations des réseaux cellulaires mobiles avec les adaptations nécessaires pour répondre aux exigences de l'IoT. Les réseaux LPWAN sont également capables de dépasser la restriction à courte portée des réseaux locaux (LAN) [81]. Parmi les solutions possibles figurent les technologies de la bande ISM propriétaires et sans licence, Sigfox, LoRa, par rapport aux solutions des réseaux cellulaires mobiles telles que LTE-A et NB-IoT.

Des travaux récents de recherche sur les technologies LPWAN ont été étendus

pour évaluer les performances des réseaux LPWAN [52, 4, 87, 82, 78, 88, 83, 86, 85, 18, 84]. La plupart de ces travaux décrivent une technologie unique, ne comparant que deux technologies, basées sur la couche physique et sur des études expérimentales. Dans [52], plusieurs structures de LoRaWAN sont illustrées et modélisées avec de nombreux scénarios prenant en compte la couche physique concentrant sur le problème de l'extensibilité du réseau. Dans [87], les performances d'ALOHA pur utilisés par LoRa et Sigfox sont examinées et les expressions de débit théoriques des deux technologies sont dérivées. Les auteurs de [4] ont présenté une étude comparative et descriptive des différences techniques entre LoRa et NB-IoT en termes de caractéristiques physiques, d'architecture de réseau et de protocole MAC. Dans [82], une étude de simulation technique est présentée pour comparer le protocole CSS et le protocole de propagation du spectre à bande ultra-étroite en termes de leur sensibilité au bruit, ainsi qu'une étude d'évolutivité du réseau a été présentée visant à évaluer la gestion de collisions et des interférences inter et intra-cellules, mais les nombreux paramètres de réseau ne sont pas suffisamment exposés. Dans [78], quelques informations intéressantes sur les performances de décodage dans LPWAN avec des collisions de paquets sont exposées, mais le modèle est basé seulement sur la couche physique. Plusieurs études expérimentales sur les technologies LPWAN sont en cours d'introduction dans [83, 86, 85, 18, 84].

Les auteurs de [83] ont montré les limites de LoRaWAN en termes de périodicité et de taille des données en raison de la réglementation de bande ISM. Cette réglementation limite également la quantité maximale de données pouvant être envoyée par jour, fixée à 1% (cycle de service en Europe). Ensuite, ils ont évalué la qualité du signal reçu de différents endroits, afin de vérifier la faisabilité de couvrir un bâtiment entier avec la technologie LoRaWAN. La différence dans la composition des cloisons entre les salles et les planchers de laboratoire n'a pas eu beaucoup d'impact sur la qualité de la transmission et la perte de paquets. Dans [86], les auteurs présentent trois technologies LPWAN : Sigfox, Ingenu et LoRa en termes de portée, débit et le nombre des terminaux par passerelle et décrivent plus en détail la technologie LoRa, permettant ainsi d'apprécier certains des choix techniques qui caractérisent les solutions LPWAN.

Dans [85], les auteurs décrivent le projet « Padova Smart City », en Italie. L'objectif est de développer des logiciels de contrôle qui fonctionnent dans la couche réseau.

Les auteurs de [18] présentent un banc d'essai doté d'une multitude de technologies sans fil : LoRa, Sigfox et DASH7. Du côté des données, les auteurs ont collecté et analysé les données de la ville. Dans [84], une étude a été présentée sur la couverture et la capacité de Sigfox, LoRa, GPRS et NB-IoT dans un scénario de déploiement réel couvrant 8000km^2 dans le Jutland du Nord, au Danemark. Les quatre technologies offrent une couverture extérieure supérieure à 99%, sur la base des sites existants de l'opérateur Telenor. Le GPRS n'est pas en mesure de fournir une couverture « In door » qu'à 40% des utilisateurs, tandis que Sigfox, LoRa et NB-IoT couvrent plus de 95% des utilisateurs d'intérieur, avec une perte de pénétration d'environ 20 dB.

3.2 La couche de contrôle d'accès au medium

Dans cette section, nous présentons un résumé de la couche MAC pour LoRa, Sigfox et NB-IoT ainsi que de la gestion du domaine de collision, évoquée dans le chapitre 1 pour Sigfox et NB-IoT et dans le chapitre 2 pour LoRa. Notons que LoRaWAN et Sigfox sont issus du protocole MAC de type unslotted-ALOHA [78], ce qui implique que pratiquement tous les terminaux peuvent accéder au canal à tout moment. Cependant, la liaison montante de NB-IoT utilise un accès multiple par division à fréquence unique (SC-FDMA) [57]. En SC-FDMA, l'accès multiple entre utilisateurs est rendu possible par l'attribution à différents utilisateurs de différents ensembles de sous-porteuses non superposées. Cette section compare les 3 technologies en termes de spécificités de la couche MAC. Le Tableau 3.1 illustre les valeurs numériques obtenues de [5] pour LoRa, [89] pour Sigfox et [57] et pour NB-IoT.

TABLE 3.1 – Les spécifications des protocoles LPWAN.

	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Bande	868/915 MHz	868/915 MHz	Bandes LTE
Couche physique	CSS	UNB	NB
Facteur d'étalement	$2^7 - 2^{12}$	—	—
Bande passante	500-125 KHz	1 KHz	180 KHz
Débit(Kbps)	27-0.37	0.1	250-226.7
Portée (Km)	22	63	35

3.2.1 LoRaWAN

En Europe, LoRaWAN dispose de 3 canaux « 125 kHz » dans la bande ISM. Les canaux par défaut sont les 868.10, 868.30 et 868.50 MHz. LoRaWAN utilise les transmissions limitées avec cycle de service de 1%. Le LoRaWAN fournit un débit de données dynamique, qui est obtenu en fonction de l'utilisation de différents facteurs d'étalement (SF). Le débit de données peut supporter jusqu'à 9,375 Kbps. LoRaWAN spécifie les débits de données pour la modulation LoRa entre 0,3 kbps et 9,375 kbps en fonction du SF et allant jusqu'à 27 Kbps en utilisant la modulation FSK. Dans notre simulation, le choix de SF est choisi de manière aléatoire. La relation entre SF, débit et durée de paquet est décrite dans le Tableau 2.1 du chapitre 2.

3.2.2 Sigfox

La couche MAC de Sigfox envoie 3 messages en utilisant une fréquence aléatoire dans un canal macro de 200 kHz dans la bande ISM. Le canal par défaut est le 868,130 MHz. Sigfox utilise la modulation BPSK 100 Hz à bande ultra-étroite sur plusieurs canaux. Pour chaque transmission, le terminal choisit un canal aléatoire parmi un ensemble disponible (dans notre simulation : 12 canaux) [90]. La durée du paquet peut aller jusqu'à 2 ms [89].

3.2.3 Narrow Band IoT

Une porteuse NB-IoT utilise jusqu'à douze sous porteuses (ou tons) de 15 kHz pour un total de 180 kHz. Il existe deux types de transmission pour NB-IoT : mono-ton et multi-tons. La transmission multi-tons est basée sur SC-FDMA avec le même espacement des sous-porteuses de 15 kHz, un intervalle de temps de 0,5 ms et une sous-trame de 1 ms. La transmission mono-ton prend en charge deux cas, 15 kHz et 3,75 kHz. L'espacement de 15 kHz permet la meilleure performance de coexistence avec LTE sur la liaison montante. L'espacement de 3,75 kHz single-tone utilise une durée de 2 ms. Comme la liaison descendante, une porteuse NB-IoT en liaison montante utilise une bande passante totale de 180 kHz. Le Tableau 1.4 du chapitre 1 illustre les différents types de NB-IoT.

3.3 Calcul du taux d'erreur de paquets (PER)

Cette section explique le calcul du taux d'erreur de paquets (PER), en utilisant le taux d'erreur de symbole. Le PER représente la probabilité d'erreur de paquets (PE) :

$$PER = P(PE) \quad (3.1)$$

Soit N le nombre de symboles en collision. N est une variable aléatoire avec une densité de probabilité :

$$f_N(m); m = 0, 1, 2, \dots, M, \quad (3.2)$$

où m est le nombre de symboles dans le paquet. Par le principe de probabilité totale [91] :

$$PER = P(PE) = \sum_{m=0}^M P(PE | m) f_N(m). \quad (3.3)$$

La probabilité conditionnelle de ne pas avoir d'erreur de paquet est la probabilité que tous les symboles soient corrects. Donc, la probabilité conditionnelle d'une erreur de paquets est la règle de probabilité du complément [91] :

$$P(PE | m) = 1 - (1 - p)^m \quad (3.4)$$

où p est le taux d'erreur du symbole. Par conséquent, la formule PER devient :

$$PER = \sum_{m=0}^M [1 - (1 - p)^m] f_N(m) \quad (3.5)$$

Cette densité de probabilité $f_N(m)$ dépend de la durée du paquet et du rapport cyclique. Pour Sigfox, il existe une densité de probabilité unique car elle utilise une durée

de paquet constante de 2 ms. Pour LoRa et NB IoT, il existe de nombreux cas de densité de probabilité en raison de l'utilisation d'une durée de paquet différente. Deux cas seront étudiés dans les sections suivantes : le cas où le paquet transmis est plus court que les paquets en collision, et le cas inverse.

3.3.1 Paquet plus court que les paquets en collision

Dans cette section, nous abordons le cas où le paquet est plus court que le paquet en collision. Lorsque le paquet attendu rentre en collision avec un autre paquet (« collide packet »), le processus est aléatoire. La Figure 3.1 montre deux paquets en collision avec trois possibilités : 1- le paquet entre complètement en collision avec un paquet (« collide packet ») , 2- le paquet n'entre pas en collision avec des paquets (« collide packet »), 3- le paquet entre partiellement en collision avec un paquet (« collide packet »). Nous pouvons relier ces cas à la valeur des symboles en collision. Dans la possibilité 1, le nombre de symboles en collision est égal à M . Dans la possibilité 2, le nombre de symboles en collision est égal à zéro. Et enfin, dans la possibilité 3, le nombre de symboles en collision est inférieur à M .

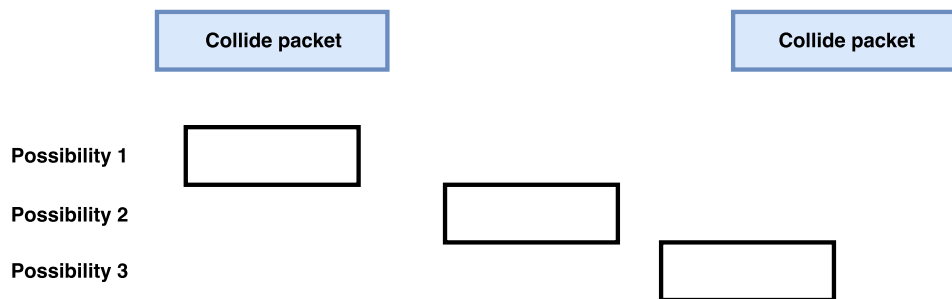


FIGURE 3.1 – Collision de paquets avec des paquets transmis plus courts que des paquets en collision [92].

Si les paquets en collision ont une durée fixe, nous pouvons voir que la densité de probabilité $f_N(m)$ prendra une forme particulière :

$$f_N(m) = \begin{cases} c_1 & \text{if } m = 0 \\ c_2 & \text{if } m = 1, 2, \dots, M - 1 \\ c_3 & \text{if } m = M \end{cases} \quad (3.6)$$

Il y a donc une probabilité de non collision. Il existe également une probabilité de collision totale. La situation intéressante dans ce cas est que la probabilité de m collisions pour m entre 1 et $M - 1$ est constante.

Le taux d'erreur de paquet court (pc) pour ce cas est donné par :

$$PER_{pc} = c_2 \sum_{m=1}^{M-1} [1 - (1-p)^m] + c_3 [1 - (1-p)^M] \quad (3.7)$$

3.3.2 Paquet plus long que les paquets en collision

Dans cette section, nous expliquerons le cas où le paquet envoyé est plus long que celui en collision. Comme pour le cas précédent, le processus de collision est aléatoire, voir la Figure 3.2. Ici trois cas peuvent être distingués. Comme le paquet est plus long qu'un (« collide packet »), il y a un nombre maximal de collisions de symboles dans le paquet. Appelons ce nombre F .

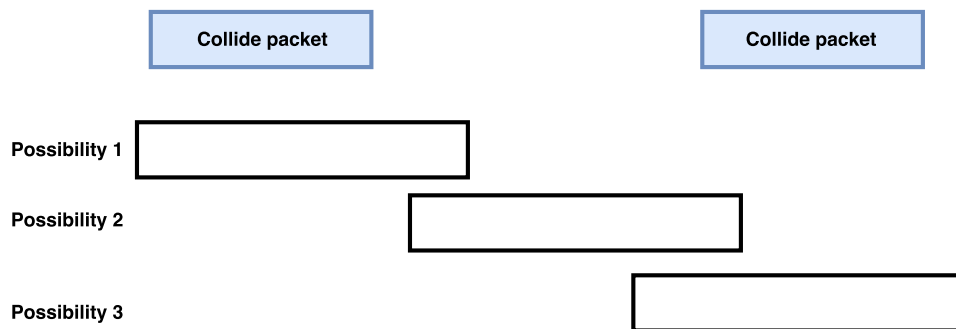


FIGURE 3.2 – Collision de paquets avec des paquets transmis plus longs que des paquets en collision [92].

Si les paquets (« collide packets ») ont une durée fixe, nous pouvons voir que la densité de probabilité prendra une forme similaire à celle du cas précédent. La seule différence est que le nombre maximal de collisions de symboles est F et pas M . Nous pouvons alors utiliser ce même formulaire dans les deux cas, car nous pouvons remplacer M par F .

$$f_N(m) = \begin{cases} c_1 & \text{if } m = 0 \\ c_2 & \text{if } m = 1, 2, \dots, F - 1 \\ c_3 & \text{if } m = F \\ 0 & \text{if } m = F + 1, F + 2, \dots, M - 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

Le taux d'erreur de paquet long (pl) dans ce cas est donné par :

$$PER_{pl} = c_2 \sum_{m=1}^{F-1} [1 - (1 - p)^m] + c_3 [1 - (1 - p)^F] \quad (3.9)$$

Ces deux développements nous permettent de disposer d'une expression du PER qui sera utilisée dans la suite des travaux.

3.4 Évaluation du taux d'erreur de paquets pour LoRa-WAN, Sigfox et NB-IoT

Dans cette section, une comparaison entre les trois standards LoRa, Sigfox et NB-IoT est présentée. Le PER est utilisé comme critère de comparaison, calculé en fonction du nombre de collisions ou d'échecs de transmission, basé sur des simulations sous MATLAB.

3.4.1 Modèle du système

Le modèle du système utilisé pour la mesure et la comparaison se repose sur trois réseaux homogènes, comprenant des liaisons LoRaWAN, Sigfox et NB-IoT. Ce modèle se concentre sur la transmission aléatoire de la liaison montante dans un intervalle de temps spécifié. La simulation prend également en compte l'utilisation du spectre autour d'une passerelle :

- Dans un premier temps, pour chacun des trois standards, nous considérons un temps discret de 60 secondes divisé en intervalles de temps « time slots (T_s) » identiques de 10 ms, et chaque transmission occupe un T_s .

- Dans un deuxième temps, nous procédons au calcul des collisions. Pour LoRa, la

collision se produit lorsque deux paquets utilisant le même SF en même temps. Pour Sigfox et NB-IoT, la collision survient lorsque deux paquets arrivent à la passerelle en même temps sur le même canal.

Ensuite, nous calculons le PER : pour chaque standard LoRa et NB-IoT, le PER se manifeste lorsque le paquet reçu ne ressemble pas aux paquets envoyés. Pour Sigfox, le PER correspond aux 3 paquets mal reçus. Pour LoRa, deux types de simulations ont été réalisés : la première a été établie pour les terminaux contenant des paquets avec un SF sélectionné de manière aléatoire ; la seconde concerne les terminaux envoyant des paquets avec un SF unique. Pour, NB-IoT, nous simulons les deux cas : multi-tons et mono-ton. Notons que, nous avons fixé un objectif de 10% de PER comme seuil de qualité acceptable, couramment utilisé par les opérateurs mobiles [93].

3.4.2 Résultats de simulations

a) LoRa

Nous avons simulé jusqu'à 10 000 transmissions en utilisant les six SFs (de 7 jusqu'à 12) pendant une minute. La Figure 3.3 montre l'évolution du PER pour LoRa en fonction du nombre de messages transmis pour des différents SF jusqu'à 10000 terminaux transmettant pendant une minute.

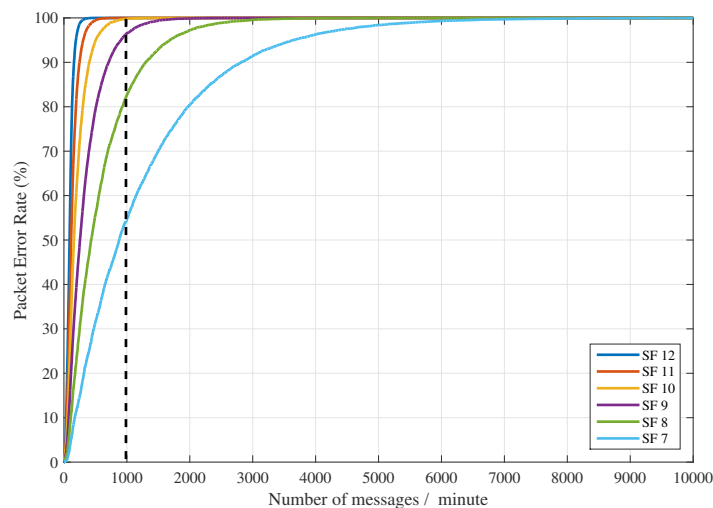


FIGURE 3.3 – Simulation de l'évolution du PER pour LoRa en utilisant un SF unique jusqu'à 10 000 terminaux transmettant pendant une minute.

On constate que l'utilisation d'un SF plus bas engendre un PER faible, pour un nombre constant de messages transmis.

La Figure 3.4 représente un "zoom" de la Figure 3.3, le PER de 10% est atteint pour un nombre de terminaux de 80, alors que cette probabilité est atteinte pour un nombre de terminaux de 25 quand SF 12 est adopté. Pour respecter le seuil de PER de 10%, on constate qu'avec LoRa, le nombre maximal de terminaux qui peuvent transmettre simultanément se situe entre 25 terminaux (pour SF 12) et 180 terminaux (pour SF 7).

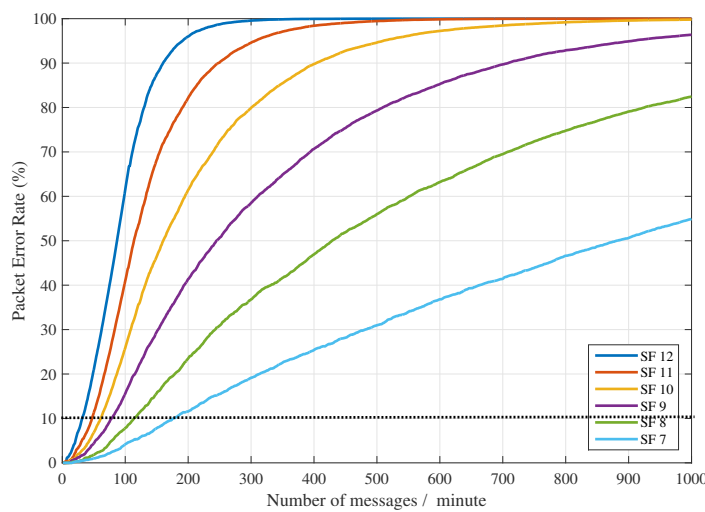


FIGURE 3.4 – Simulation de l'évolution du PER pour LoRa en utilisant un SF unique jusqu'à 1000 terminaux transmettant pendant une minute.

Les résultats obtenus pour LoRa avec plusieurs SF sont logiques par rapport à l'équation 3.3 et au tableau 2.1, où, on constate qu'en utilisant un SF plus élevé, le nombre de symboles dans le paquet est plus important que dans le cas d'un SF inférieur étant donné que la durée du paquet pour un SF supérieur est plus grande par rapport au paquet de durée du SF inférieur.

b) NB-IoT

Nous avons simulé jusqu'à 50 000 transmissions en utilisant les différents types de tons pendant une minute. La Figure 3.5 montre le PER de tous les types de NB-IoT utilisant les multi-tons et les mono-tons en fonction du nombre de messages transmis au cours de la minute. On peut constater que le PER diminue à mesure que le nombre

de tons augmente : le PER de 12 tons est meilleur que le PER de 6 tons, 3 tons, 1 ton et single-tone. Le single-tone maintient un PER de 10% lors de l'utilisation de 1000 terminaux. Ce PER est obtenu lors de l'utilisation de 2000 terminaux pour 3 tons et de 3000 terminaux pour 6 tons. Par contre, pour 12 tons, le PER n'est que de 10% pour 12 500 terminaux.

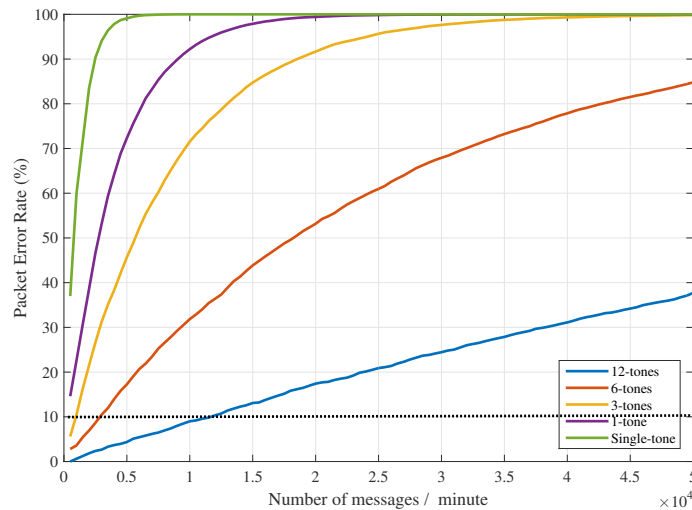


FIGURE 3.5 – Simulation de l'évolution du PER pour NB-IoT jusqu'à 50 000 terminaux transmettant pendant une minute.

On observe ainsi que les résultats obtenus pour NB-IoT sont compatibles avec l'équation 3.3, dans laquelle l'utilisation de 12 tons, le nombre de symboles dans le paquet et la durée du paquet sont inférieurs à tous les autres tons.

c) Comparaison des résultats

Afin de comparer les résultats précédents, les configurations ont été retenues pour chaque standard : LoRa en SF choisi aléatoirement pour chaque transmission, Sigfox (unique) et NB-IoT en 12-tons. La Figure 3.6 montre l'évolution du PER pour LoRa, Sigfox et Nb-IoT 12 tons en fonction du nombre de messages transmis au cours d'une minute. On peut observer que le PER de NB-IoT est beaucoup mieux que les PER de Sigfox et LoRa. Pour LoRa, le PER de 10% est atteint pour un nombre de terminaux de 600. C'est le cas réel de LoRa lors du choix d'un SF différent pour transmettre des données à l'aide du débit adaptatif (ADR). Pour Sigfox, le PER à 10% est atteint

pour 1500 terminaux, ce qui représente un nombre énorme de terminaux par rapport à LoRa utilisant un SF aléatoire.

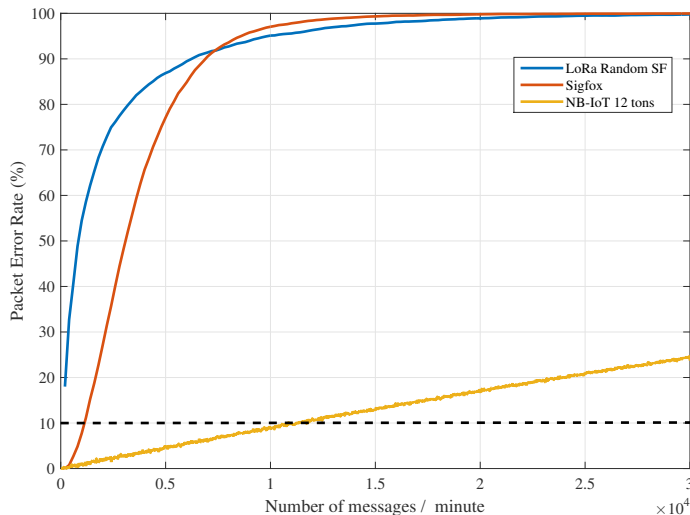


FIGURE 3.6 – Simulation du PER avec 30 000 terminaux transmettant dans une minute pour LoRa, Sigfox et NB-IoT 12-tons.

Pour les valeurs considérées des paramètres de simulations, la robustesse derrière NB-IoT est due à la largeur de bande plus grande en fonction d'une durée d'intervalle de temps plus courte ainsi que l'utilisation de sous-porteuses orthogonales (les tons). En revanche, LoRa présente une performance modérée par rapport à NB-IoT et à Sigfox, dont le PER est très sensible en termes de messages / minute en raison de la bande passante et de la durée de transmission de paquet.

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons décrit les fonctionnalités de la couche MAC pour LoRa, Sigfox et NB-IoT par rapport aux durées de transmissions des paquets et au nombre de canaux utilisés. En outre, nous avons fixé un seuil de 10% de PER comme le seuil de qualité acceptable normalement utilisé par les opérateurs mobiles, afin d'évaluer la couche MAC pour ces trois standards IoT en termes de PER. En conclusion, NB-IoT est plus robuste en termes de PER que LoRa et Sigfox, en raison de l'utilisation de sous-porteuses, la large bande passante adoptée et de la faible durée

de transmission par rapport à LoRa et Sigfox. Dans le prochain chapitre, l'amélioration apportée à LoRa sera présentée ainsi que son l'évaluation de ses performances à travers un notre simulateur implémenté sous MATLAB.

LoRa+ : ÉVOLUTION DE PROTOCOLE LoRaWAN POUR L'AMÉLIORATION DE LA QoS

Dans ce chapitre, nous proposons un protocole appelé LoRa+ pour améliorer la Qualité de Service du protocole LoRaWAN en matière de taux de paquets rejetés et de taux de paquets erronés. Nous utilisons notre simulateur MATLAB pour évaluer les performances de ces deux protocoles.

4.1 Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2, LoRa est une couche physique pour les LPWAN utilisant les modulations CSS qui peuvent étendre de manière adaptative la portée de la communication en réduisant le débit. Au-dessus de cette couche, LoRaWAN définit un protocole MAC simple basé sur une spécification ouverte. Ce protocole permet aux terminaux de communiquer avec un serveur de réseau via des passerelles avec un faible cycle de service (1% en Europe). Le problème principal dans LoRaWAN est lorsque deux terminaux (ou plus) émettent simultanément en utilisant les mêmes paramètres (tels que canal et SF) sont reçus par la passerelle avec une puissance similaire, une collision se produit, en effet, aucun des signaux n'est décodé par le récepteur LoRa. De plus, l'attribution des SFs dans LoRaWAN pose des problèmes surtout dans les environnements interférents ce qui produit des paquets rejetés (i.e. reçus au dessus du seuil de sensibilité) au niveau de la passerelle. Pour cela, nous proposons une modification du protocole LoRaWAN pour les terminaux des Classes A et B dans le but de réduire le taux de paquets rejetés, basé sur les déci-

sions prises au niveau de la couche physique. Cette modification consiste à décaler la deuxième fenêtre de réception RX2 avant la fenêtre de transmission. Cela permet de collecter les paramètres du canal pour une transmission de liaison montante fiable. Elle améliore significativement la Qualité de Service (QoS), diminue le taux de paquets rejetés et diminue le PER, comme indiqué dans nos simulations MATLAB. Notre protocole proposé est extensible à la classe C mais nous ne traitons pas cette classe car elle est toujours en mode d'écoute contrairement aux classes A et B (RX2 reste ouvert tout le temps).

4.2 État de l'art

Depuis cinq ans, les LPWAN sont un domaine de recherche actif. Dans cette section, nous présentons plusieurs études pertinentes liées aux performances du protocole LoRaWAN. Ces contributions peuvent être divisés en deux catégories : la première concerne l'évaluation des performances des réseaux LoRa à l'aide de scénarios analytiques et réels, tandis que dans la seconde, de nouveaux algorithmes ont été proposés pour améliorer les performances LoRaWAN. Nous commençons par la première catégorie.

Les auteurs de [94] ont décrit et analysé une installation expérimentale de LoRa dans la ville de Rennes en prenant en compte l'élévation des antennes et l'environnement (urbain, rural et suburbain). Comme attendu, l'emplacement de l'antenne et en particulier son élévation jouent un rôle majeur dans les performances du réseau. Les résultats montrent que, dans des bonnes conditions du canal (faible nombre d'utilisateurs, conditions climatiques favorables, faible évanouissement), les pertes de trames sont très faibles (environ 3%), tandis que dans des mauvaises conditions du canal, les pertes de trames peuvent atteindre 100%. Les auteurs de [95] ont proposé un modèle analytique considérant que l'atténuation de Rayleigh met en évidence les probabilités de couverture des passerelles d'un réseau. Ce travail montre que les réseaux LoRa sont sensibles à la densité du réseau. Les auteurs de [76] ont exploré l'interaction des caractéristiques de LoRaWAN, telles que la communication bidirectionnelle et la limitation du cycle de service (duty cycle), et ont proposé de nouveaux compromis tenant compte de la consommation d'énergie, de la fiabilité et de l'évolutivité du réseau. Ils ont également montré que le cycle de service limitait le trafic de téléchargement généré

par les passerelles LoRaWAN. Les auteurs de [96] ont analysé l'impact des variations de trafic dans les réseaux LoRa. Ils ont démontré qu'une passerelle LoRa était affectée par une rafale de données ce qui a conduit à la dégradation des performances, en particulier lorsque les terminaux sont proches et transmettent simultanément. Les auteurs de [97] ont étendu le modèle mathématique d'accès au canal LoRaWAN de [98] au processus de transmission de données en analysant l'effet de capture et en utilisant le modèle Okumura-Hata vu qu'il est capable de reproduire les contraintes liées à l'environnement de communication.

Divers travaux utilisent des mesures pour évaluer les performances des réseaux LoRa. Les auteurs de [99] ont analysé l'évolutivité du réseau LoRa et ont souligné l'importance de la validation expérimentale dans des environnements terrestre et aquatique pour des nœuds statiques et mobiles. Les résultats montrent que, lorsqu'on utilise un facteur d'étalement élevé (SF), le taux de pénétration est supérieur à 60% sur une distance de 30 km sur l'eau et jusqu'à 10 km sur le sol. Ils ont également observé que la communication se détériorait lorsque la vitesse du nœud était d'environ 40 km/h. Des résultats similaires sont obtenus avec des mesures de LoRa effectuées dans d'autres environnements, tels que les applications intérieures [83], les campus universitaires [100], les applications de comptage intelligent [101] et les centres-villes [102, 103].

Récemment, certains travaux publiés ont tenté d'améliorer les performances du protocole LoRa en exploitant des paramètres de communication tels que : la charge utile, débit, efficacité énergétique, utilisation des antennes directives. Les auteurs de [68] ont étudié l'algorithme ADR (Adaptive Data Rate) proposé par l'alliance LoRaWAN. Dans cet article, les auteurs s'intéressent davantage à l'impact de différents paramètres configurables sur le temps de convergence de l'algorithme : la convergence lente de l'algorithme ADR entraîne des pertes de paquets et une consommation d'énergie plus élevée. Les auteurs de [4] ont étudié les capacités et les limites de LoRaWAN lors de l'adoption d'une stratégie visant à déterminer si la technologie LoRaWAN fonctionnait (surveillance et comptage en temps réel) ou non dans plusieurs cas d'utilisation réels (surveillance vidéo). Les auteurs de [104] ont proposé une approche de débit de données adaptatif prenant en compte les conflits de contention pour augmenter le nombre de nœuds utilisant de faibles taux de conversion afin de

maximiser le débit du réseau. Afin d'étudier l'impact du trafic en liaison descendante, les auteurs de [105] ont caractérisé les performances de LoRa. Cette étude a montré l'effet négatif important de la communication sur la liaison descendante et sur les performances de la liaison montante. Les auteurs de [106] ont testé l'influence de la variation sur l'observation de la longueur de la charge utile et du taux de livraison des paquets. Par la suite, l'évaluation des performances dans différents scénarios a abouti à une couverture de 6 km dans les zones urbaines et à plus de 18 km dans le scénario rural. Les auteurs de [107] ont proposé d'appliquer à LoRaWAN un algorithme capable d'annuler deux signaux en collision et de modifier la couche MAC afin de permettre des transmissions synchronisées. L'algorithme proposé apporte des améliorations de performances remarquables par rapport au LoRaWAN classique en termes de débit et d'efficacité énergétique. Les auteurs de [108] ont envisagé des antennes directives pour améliorer la puissance du signal sans augmenter le coût de l'énergie de transmission. Ils ont également envisagé l'utilisation de plusieurs passerelles pour améliorer la probabilité de décodage. Les résultats démontrent que l'utilisation d'une antenne directive et de plusieurs passerelles peut améliorer les performances sous interférence.

Les auteurs de [109] ont proposé deux algorithmes peu complexes pour rendre les réseaux LoRa évolutifs en répartissant la décision d'accès au canal et pour permettre une allocation optimale des ressources. Les résultats montrent un bon compromis entre la complexité matérielle, les performances du système et la durée de vie de la batterie des terminaux LoRa. Les auteurs de [110] ont exploré les paramètres de configuration de LoRa avec 6720 combinaisons possibles. Les auteurs ont aussi proposé qu'un nouveau protocole basé sur la configuration des paramètres de transmission puisse être ajouté à LoRaWAN tels que la puissance de transmission, la bande passante, le taux de codage et le SF, ce qui minimise la consommation d'énergie tout en maintenant les besoins de transmission. Les auteurs de [111] ont proposé deux nouvelles stratégies d'allocation de ressources à LoRaWAN. Les deux stratégies étaient basées sur une combinaison d'orthogonalité de SF et de distance pour améliorer le nombre d'utilisateurs transmettant simultanément et réduire les collisions. Les résultats montrent que ces deux stratégies surpassent la stratégie de base d'allocation de ressources à LoRaWAN.

Tous les travaux présentés ici montrent la nécessité d'améliorer la QoS, car celle-ci

se dégrade à cause de plusieurs facteurs, notamment l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Les simulations réalisées dans le cadre de cette thèse ont bien confirmées cette constatation. Nous venons également de voir, à travers cette section, que plusieurs solutions ont été proposées mais se basent dans l'ensemble sur l'application d'algorithmes existants sur le protocole LoRaWAN. Bien que cette démarche soit intéressante, elle peut s'avérer coûteuse à mettre en œuvre. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de notre solution proposée « LoRa+ », à savoir l'amélioration de la QoS avec une démarche efficace, simple et moins coûteuse. En effet, cette amélioration est basée sur l'exploitation du taux de paquets rejetés, en réduisant le nombre de passerelles. La section suivante a comme objectif de détailler cette solution, à savoir sa conception, sa modélisation ainsi que son évaluation.

4.3 Le protocole LoRa+

Le protocole LoRa+ est basé sur le protocole LoRaWAN avec modifications au niveau de l'emplacement de RX2. Dans LoRa+ Classe A, nous proposons d'ajouter une nouvelle trame appelée trame de configuration qui est transmise via le slot RX2. Cette trame de configuration est utilisée pour la synchronisation. Elle est définie comme un protocole d'activation à faible consommation d'énergie utilisé par la passerelle pour interroger le terminal de la Classe A. La passerelle commence par transmettre en continu la trame de configuration afin d'inonder un canal dédié quelques secondes avant et quelques secondes après le début de la transmission. Chaque trame contient l'heure estimée d'arrivée¹ (ETA), qui correspond à l'instant d'envoi de la trame de données contenant la commande MAC aux terminaux. En ce qui concerne la classe B, LoRa+ utilise le même processus de synchronisation que LoRaWAN en déplaçant aussi la fenêtre RX2. Dans les prochaines sections de ce chapitre, nous détaillerons notre proposition concernant les classes A et B.

4.3.1 Spécifications du LoRa+ Classe A

Contrairement à LoRaWAN, dans LoRa+, la fenêtre RX2 sera ouverte avant la transmission de liaison montante, qui correspond à la fenêtre suivie de RX1 dans LoRaWAN, comme illustré dans la Figure 4.1. Nous proposons d'ajouter une fenêtre RX2

1. **Estimated Time Arrival.**

avant la liaison montante et non pas RX1. Le but de cette modification est que le RX2 utilise un canal prédéfini et un débit de données fixe connu pour tous les terminaux. Par conséquent, la passerelle, similaire à LoRaWAN, peut gérer les terminaux en utilisant un seul canal spécialisé pour les configurations. Dans ce cas, la décision du canal, telle que le SF, la fréquence du canal et le débit de données, seront communiqués au terminal juste avant la transmission de la liaison montante, comme indiqué dans la Figure 4.2.

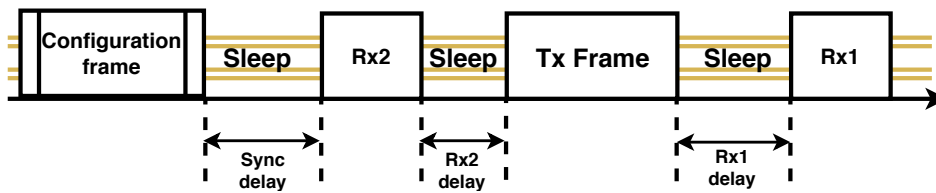


FIGURE 4.1 – Chronogramme du LoRa+ Classe A.

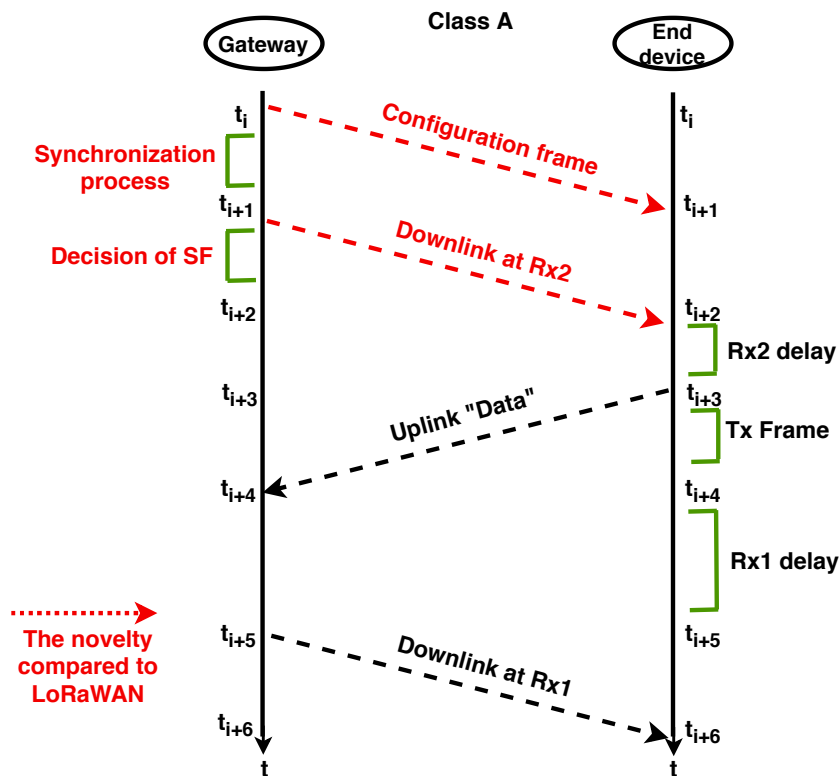


FIGURE 4.2 – Diagramme de séquence pour LoRa+ Classe A.

Comme déjà indiqué dans la Section 2.3.1, le terminal de la Classe A dans LoRa+

est supposé transmettre d'une façon cyclique. Au début de T, le terminal se réveille et commence à écouter les trames de configuration entrantes via RX2, ceci assure la synchronisation de l'horloge entre le terminal et la passerelle comme indiqué dans la Figure 4.3. À la réception de la trame, le terminal extrait la valeur de temps et repasse en mode veille jusqu'à ce que le ETA se soit écoulé. Ensuite, le terminal se réveille et décide de transmettre ou de configurer avant de transmettre. Cette trame de configuration est inspirée du protocole DASH7 [112].

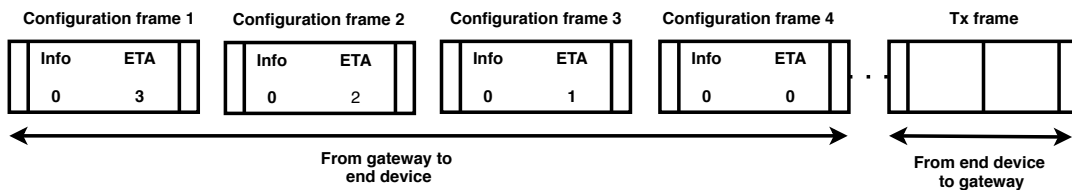


FIGURE 4.3 – Trame de configuration pour la Classe A.

4.3.2 Spécifications du LoRa+ Classe B

Comme dans la Classe A, le RX2 dans la Classe B sera ouvert juste avant la transmission, comme le montre la Figure 4.4. La Figure 4.5 montre le diagramme de séquence des terminaux de la Classe B dans LoRa+. En Classe B, la passerelle transmet une balise de manière synchrone « Beacon ». Dès que le terminal décide de se réveiller pour envoyer des données, il répond à la passerelle par un signal « Ping » prouvant qu'il est prêt à recevoir les décisions (SF, débit de données, canal) via la fenêtre prédéfinie RX2. Après avoir reçu les décisions, le terminal envoie les données de la trame Tx à la passerelle, puis ouvre la fenêtre RX1 après un délai et, à la fin, reçoit une balise de la part de la passerelle pour terminer l'échange. Dans ce cas-là, la trame Tx doit utiliser les bons paramètres de transmissions.

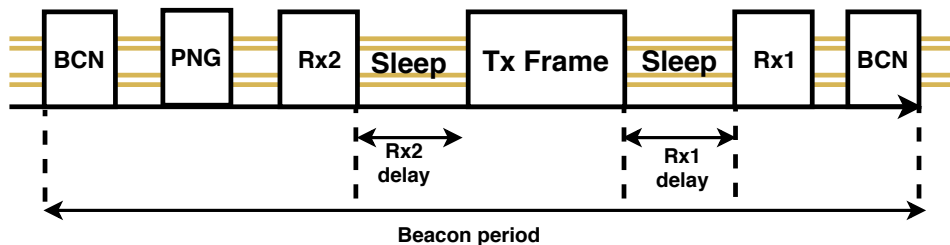


FIGURE 4.4 – Chronogramme du LoRa+ Classe B.

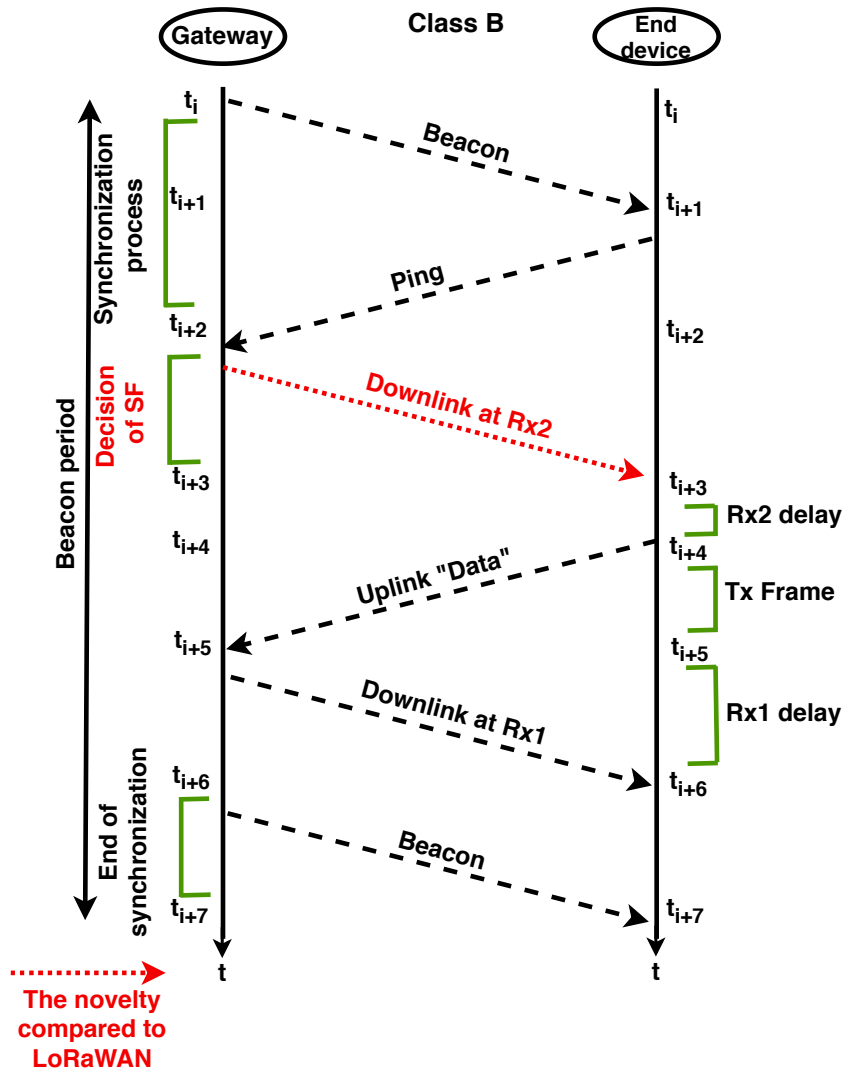


FIGURE 4.5 – Diagramme de séquence pour LoRa+ Classe B.

4.3.3 Fonctionnement du protocole LoRa+

L'idée principale de LoRa+ est d'améliorer la QoS en créant un protocole inter-couche (*cross-layer*) qui agit entre la couche physique et la couche MAC. Ce protocole comprend deux parties. La première consiste à réduire le taux de paquets rejetés (en fonction de la couche physique). La seconde réduit le taux des paquets erronés (PER) (basé sur la couche physique et la couche MAC). En ce qui concerne le taux de paquets rejetés, la passerelle permet d'estimer le canal pour prédire le RSSI en fonction

de plusieurs paramètres définis dans l'équation 4.1 [64].

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{SYSTEM}(dB) - L_{SYSTEM}(dB) - L_{CHANNEL}(dB) - M(dB) \quad (4.1)$$

Après avoir estimé le canal et après le processus de synchronisation avec le terminal, la passerelle sélectionne l'un des SF (voir le Tableau 2.1 du chapitre 2) et l'envoie au terminal via RX2 juste avant la transmission des données. Pour la réduction du PER, si des transmissions consécutives utilisent le même SF, la passerelle informe les terminaux de changer le SF pour réduire la probabilité de collision. La Figure 4.6 résume les étapes et les décisions prises par LoRa+ Classes A et B depuis l'activation du terminal jusqu'à la synchronisation (en haut du logigramme), en sélectionnant le SF et en diminuant le PER jusqu'à la transmission (symbolisé par l'événement « Tx Frame » en bas du logigramme). Comme le montre cette figure, une fois que la classe du terminal est identifiée, la synchronisation est établie entre le terminal et la passerelle (en utilisant un trame de configuration pour la classe A et une balise pour la classe B). Ensuite, l'estimation du RSSI est effectuée par la passerelle qui envoie au terminal un SF adapté aux conditions du canal. Lorsque des mauvaises conditions de canal sont estimées, le terminal doit utiliser le paramètre SF = 12, car il s'agit du meilleur choix dans ce cas. Ici, SF = 12 est envoyé par la passerelle aux terminaux qui doivent les utiliser même s'ils transmettent simultanément des données. Pour RX1, son ouverture dépend de l'adoption de l'ACK dans le réseau. Si l'ACK est utilisé, le terminal doit l'écouter pendant le RX1. Une fenêtre RX1 doit donc être ouverte. D'autre part, lorsque l'ACK n'est pas adopté par le réseau, il n'est pas demandé au terminal d'ouvrir le RX1.

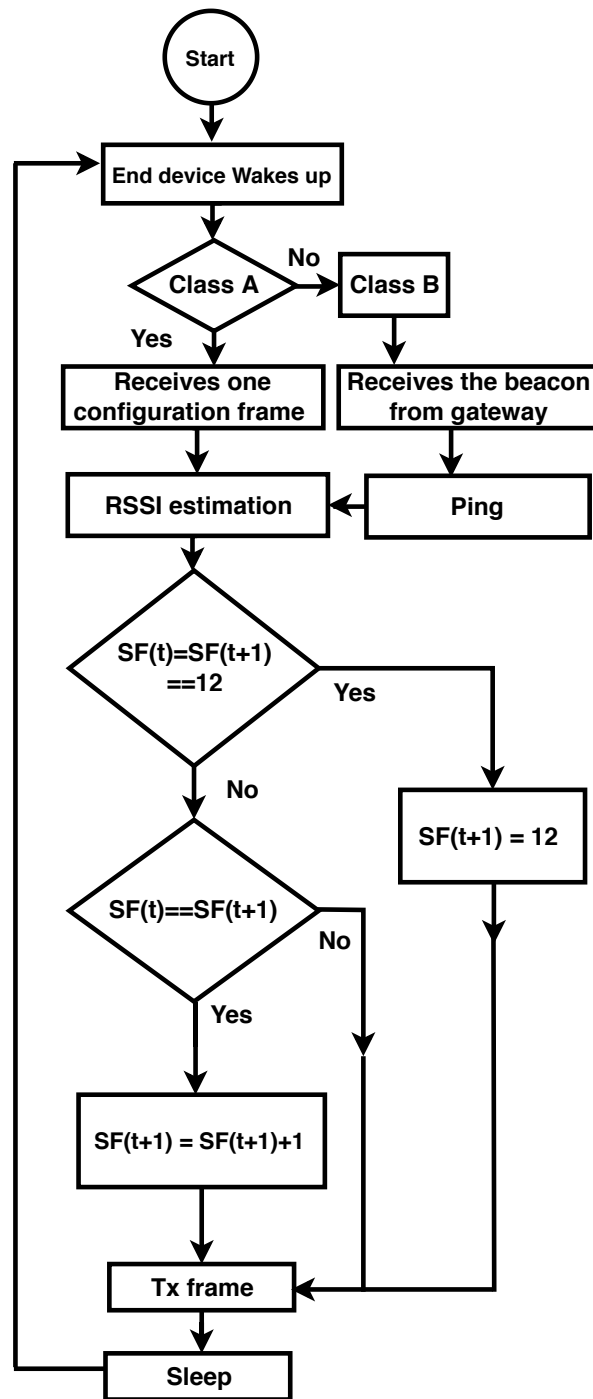


FIGURE 4.6 – Logigramme complet de LoRa+ pour les classes A et B.

4.4 Évaluation de LoRaWAN et LoRa+

Dans cette section, une comparaison entre LoRaWAN et LoRa+ est présentée. Le taux de paquets rejetés, le PER et le nombre des passerelles déployées sont les principaux critères de comparaison. Le taux de rejet des paquets est calculé en fonction de la sensibilité du canal, tandis que PER est calculé en fonction du nombre de collisions ou de défaillances au cours de la transmission.

4.4.1 Modèle de système et simulations

Le modèle de système utilisé pour la simulation et la comparaison est basé sur les réseaux LoRaWAN et LoRa+, en tenant compte des transmissions montantes et descendantes. La simulation prend également en compte le spectre utilisé autour de plusieurs passerelles. Le nombre de terminaux et de passerelles est configurable. Les terminaux sont répartis uniformément dans une couverture de 2 km ($12,5 \text{ km}^2$). Une passerelle est placée au centre de la zone de couverture tandis que les autres sont réparties uniformément dans la même zone. La Figure 4.7 montre le modèle de système utilisé dans notre simulation.

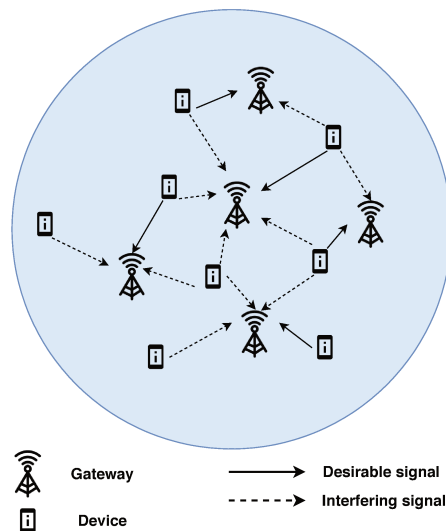


FIGURE 4.7 – Modèle de système utilisé pour la simulation.

L'observation est effectuée sur une fenêtre temporelle de 60 secondes répartie dans des intervalles de temps de 10 ms, avec une transmission chaque 10 ms. Le cycle de

service de 1% est respecté, à l'exclusion des retransmissions. Une seule transmission peut être reçue par plusieurs passerelles. Les terminaux ne coopèrent pas. Une interférence entre deux terminaux actifs (ou plus) peut se produire.

Le rapport signal sur interférence et bruit (SINR) du i ème terminal peut être calculé comme suit :

$$SINR_i = \frac{P_{u,i}}{I_i + P_{N,i}} \quad (4.2)$$

où $P_{u,i}$ est la puissance du signal émis par le terminal i . I_i est la puissance totale de bruit provenant d'autres transmissions. $P_{N,i}$ est la puissance de bruit à la i ème transmission. Pour le modèle de propagation, nous utilisons le modèle Okumura-Hata pour les petites/moyennes villes et les zones rurales, tel que recommandé par l'ETSI pour le GSM 900 MHz qui opère dans une bande de fréquence proche [113]. Dans cette étude, le logiciel MATLAB est utilisé. Le Tableau 4.1 récapitule les configurations des passerelles et des terminaux.

TABLE 4.1 – Configurations des passerelles et terminaux.

Configuration	Passerelle	Terminal
Facteur de bruit	6 dB	–
Gain de l'antenne	5 dBi	0 dBi
Élévation	100 m [94]	5 m
Nombre de nœuds	1 à 15	1 à 500
Fréquences opérationnelles	868 MHz	
Largeur du bande	125 KHz	
Puissance de transmission	14 dBm (25 mW)	
Environnements de simulation	petites/moyennes villes & zone rurale	
Itérations Monte-Carlo	nombre de terminaux	

4.4.2 Comparaison des paquets rejetés avec LoRaWAN et LoRa+

La Figure 4.8 montre les résultats simulés sous MATLAB des paquets rejetés de LoRaWAN en fonction du nombre de terminaux actifs pour les petites/moyennes villes et les zones rurales. Nous voyons clairement que le taux de paquets rejetés diminue lorsque le nombre de passerelles augmente. Pour les petites/moyennes villes, lorsque 500 terminaux actifs sont utilisés, le taux de paquets rejetés utilisant 1 passerelle est d'environ 45%, tandis qu'en utilisant 6 passerelles, le taux de paquets rejetés est d'en-

viron 16%. D'autre part, le taux de paquets rejetés utilisant 1 passerelle pour 500 terminaux actifs pour les zones rurales est d'environ 53%, tandis qu'en utilisant 6 passerelles, le taux de paquets rejetés est d'environ 29%.

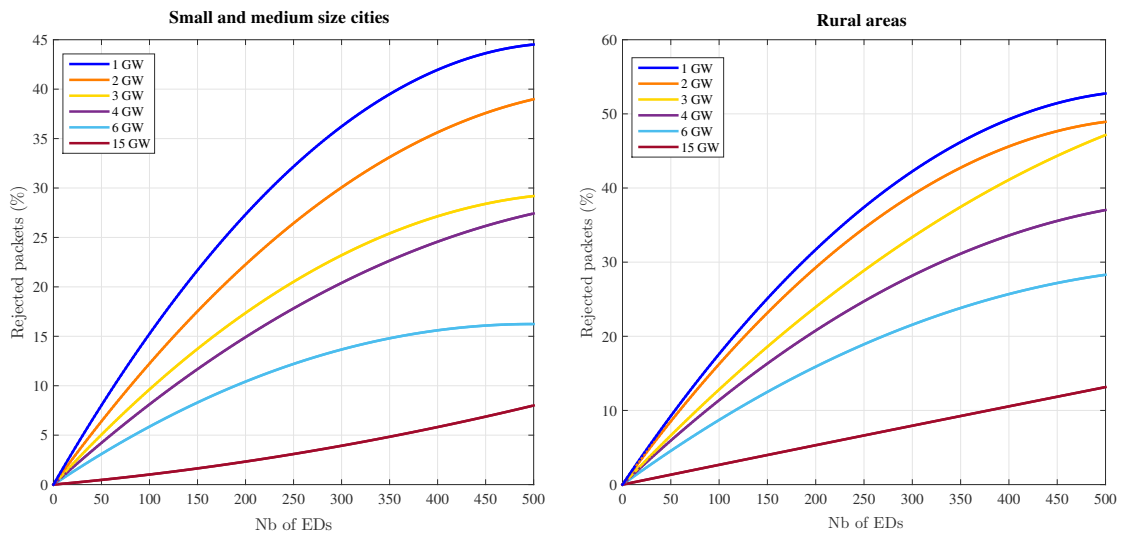


FIGURE 4.8 – Simulation de taux de paquets rejetés de LoRaWAN en fonction du nombre de passerelles : pour les petites/moyennes villes (à gauche) et les zones rurales (à droite).

La Figure 4.9 illustre la variation simulée de taux de paquets rejetés de LoRa+ en fonction du nombre de terminaux actifs pour les petites/moyennes villes et les zones rurales. Comme le montre la figure, les paquets rejetés diminuent lorsque le nombre de passerelles augmente. Pour les petites/moyennes villes, lorsque 500 terminaux actifs sont utilisés, le taux de paquets rejetés utilisant 1 passerelle est d'environ 11%, tandis qu'en utilisant 2 passerelles, le taux de paquets rejetés est d'environ 6%. En ce qui concerne les zones rurales, lorsque 500 terminaux actifs sont utilisés, le taux de paquets rejetés utilisant 1 passerelle est d'environ 15%, tandis que pour 2 passerelles, le taux de paquets rejetés est d'environ 12%.

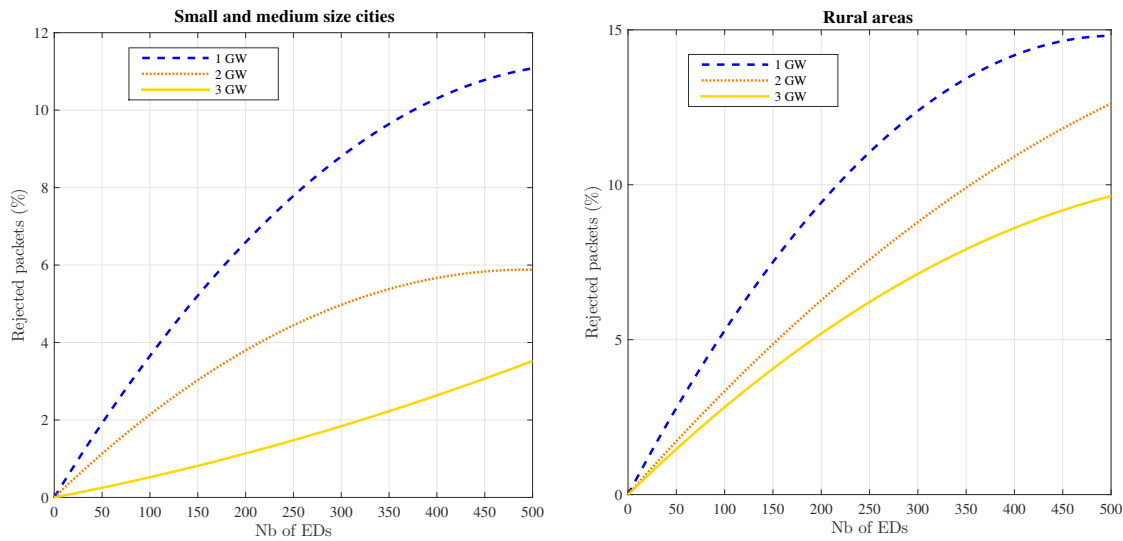


FIGURE 4.9 – Simulation de taux de paquets rejetés de LoRa+ en fonction du nombre de passerelles pour les petites/moyennes villes (à gauche) et les zones rurales (à droite).

Ces résultats de simulation montrent clairement que la performance de LoRa+ est due au mécanisme d'écoute avant transmission. Cette amélioration est due au déplacement de RX2 avant la trame Tx et en ajustant les paramètres de couche physique. Du point de vue des opérateurs du réseau, la QoS correspond à un coût d'exploitation. L'un des indicateurs de performance clés les plus importants est probablement le taux de paquets rejetés. L'investissement dans le réseau d'accès radio dépend largement du nombre de passerelles qui devront être minimisées pour une QoS donnée.

La Figure 4.10 présente le pourcentage de paquets rejetés en fonction du nombre de passerelles dans les environnements ruraux et urbains. Pour LoRaWAN et LoRa+, le taux de paquets rejetés des zones urbaines est supérieur à celui des zones rurales avec un objectif de QoS fixé à 10% inspiré des opérateurs du réseaux cellulaires [93]. Comme le montre cette figure, le pourcentage de paquets rejetés liés à notre protocole LoRa+ devient inférieur à ce seuil en utilisant respectivement 2 et 3 passerelles pour les villes et les zones rurales. En revanche, LoRaWAN a besoin de 10 à 15 passerelles pour atteindre le même objectif de QoS respectivement pour les villes et les zones rurales. La mise en œuvre de LoRa+ conduit donc à réduire les coûts de déploiement du réseau de manière significative.

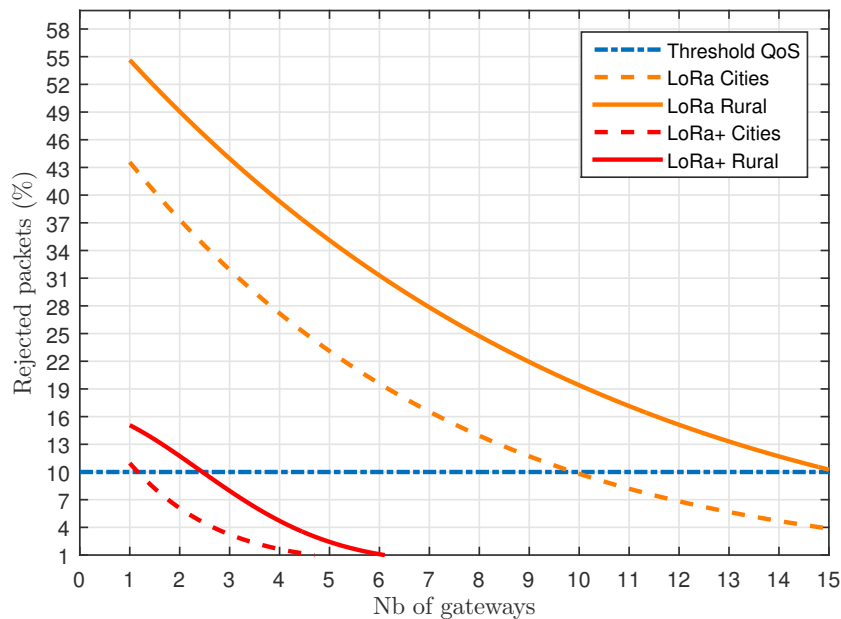


FIGURE 4.10 – Pourcentage de paquets rejetés par rapport au nombre de passerelles pour LoRaWAN et LoRa+ dans les villes et les zones rurales.

4.4.3 Comparaison de PER pour LoRaWAN et LoRa+

Dans cette section, nous comparons le PER pour LoRaWAN et LoRa+ en fonction de nombre de terminaux actifs pour les petites/moyennes villes autour d'une passerelle. La Figure 4.11 montre les résultats de simulation du PER pour LoRaWAN et LoRa+ basés sur le nombre de terminaux actifs pour les petites/moyennes villes autour d'une passerelle. Dans cette figure, nous pouvons voir que le PER de LoRa+ est inférieur au PER de LoRaWAN. Pour LoRa+, nous avons obtenu un PER de 60% pour 150 terminaux actifs, alors qu'avec LoRaWAN, la même pourcentage est obtenue en utilisant 100 terminaux. De plus, lorsque 500 terminaux sont utilisés, le PER de LoRa+ est d'environ 79%, contre environ 85% pour LoRaWAN.

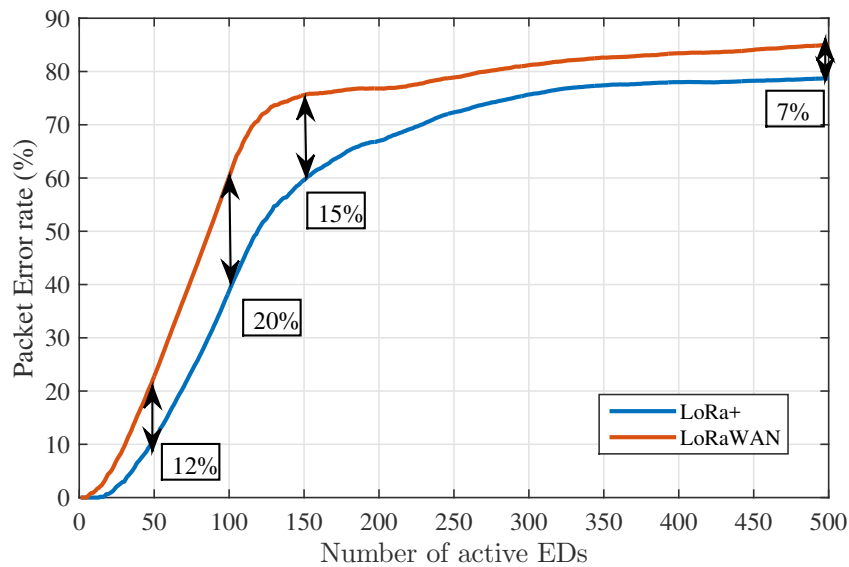


FIGURE 4.11 – Simulation de PER de LoRaWAN et LoRa+ pour les petites/moyennes villes utilisant une passerelle.

En conséquence, notre algorithme proposé réduit considérablement le PER. En effet, le SF modifie 2 transmissions consécutives en cas de besoin, contrairement au mécanisme de LoRaWAN dans lequel le SF reste le même.

4.4.4 Validation des simulations par rapport à l'état de l'art

Après avoir implémenté notre simulateur LoRa sous MATLAB, l'objectif de cette section est de valider notre simulateur LoRa à travers la comparaison des résultats obtenus sous ce dernier, avec ceux obtenus sous d'autres simulateurs. Une étude comparative a été réalisée en exploitant deux métriques : le nombre de passerelles déployées dans une grande ville et le PER. Dans notre travail, la performance du réseau LoRa est déterminée en comptant le nombre de paquets rejetés et/ou erronés, ainsi que le nombre de passerelles déployées. À ce jour, plusieurs travaux sont réalisés portant sur le nombre de terminaux, sur l'évolutivité du réseau, sur la portée radio et sur la consommation énergétique (durée de vie de la batterie). Cependant, Notre démarche prend en compte le taux de paquets rejetés en fonction du nombre de passerelles déployées.

En se référant aux résultats, pour un objectif de QoS de 10% de taux de paquets rejetés, un réseau LoRa doit faire appel à 10 passerelles dans une couverture urbaine dense d'environ 12.5km^2 , soit $1.25\text{km}^2/\text{passerelle}$. Les auteurs de [114] ont construit un simulateur MATLAB pour évaluer un scénario d'application de comptage intelligent à Paris où la densité des compteurs électriques peut être évaluée approximativement à $18\,000\text{compteurs}/\text{km}^2$, faisant appel à 19 passerelles avec une distance inter-site de 1km correspondant à une couverture radio d'environ 17km^2 , soit $1.12\text{km}^2/\text{passerelle}$. À cet égard, les résultats de nos mesures s'avèrent cohérents avec ceux de [114].

Par ailleurs, en ce qui concerne le PER, l'interférence inter-SF est à l'origine des (plus forts) PER les plus importants sur les canaux partagés. Les auteurs de [115] ont considéré le cas où un terminal cible et un interféreur fonctionnant avec SF 12, environ 66% des paquets erronés ont été reçus pour des SNR de mêmes niveaux. Ces résultats nous apparaissent adéquats par rapport aux nôtres, nous avons obtenu un PER pour LoRa utilisant des SFs aléatoires variant entre 60% (pour 100 terminaux) et 85% (pour 150 terminaux).

Ces résultats nous permettent de valider le simulateur LoRa+.

4.5 Discussion de mise en œuvre

Dans la section précédente, nous avons montré par simulation la robustesse de notre protocole proposé par rapport au taux de paquets rejetés, au PER et au nombre de passerelles déployées. L'une des tâches principales à prendre en compte est la mise en œuvre matérielle du protocole proposé.

Deux phases de mise en œuvre sont indispensables, celle de la passerelle et celle du terminal. En ce qui concerne la passerelle, sur la base d'une auto-surveillance² de canal, il convient de fournir aux terminaux les SF appropriés. La pertinence de SF dépend de la sensibilité du canal et de l'utilisation ou non de celui-ci par d'autres terminaux. Ainsi, une base de données devrait sauvegarder les SF non utilisés jusqu'à ce qu'un terminal soit prêt à transmettre tout en tenant compte de la sensibilité du canal. Dans notre protocole proposé, la passerelle doit envoyer une trame de configuration

2. **self-monitoring.**

aux terminaux juste avant que ceux-ci transmettent leurs données. Notons que cette trame de configuration est un cycle d'horloge permettant au terminal de la Classe A de régler le temps d'ouverture de la fenêtre RX2. En raison des imperfections de l'oscillateur du terminal, la durée de la trame de configuration doit rester deux secondes avant et deux secondes après la période T afin de garantir que le terminal reçoive les données appropriées de la passerelle via RX2. Pour la Classe B de notre protocole proposé, la synchronisation restera la même que celle du LoRaWAN standard, sauf que la fenêtre RX2 devrait être ouverte juste avant la transmission afin de fournir au terminal les paramètres du canal mis à jour. L'ACK peut être omis dans le réseau mis en œuvre car la passerelle et le terminal sont déjà synchronisés. L'absence d'ACK doit également avoir un impact positif sur l'autonomie du terminal en raison de la réduction de la puissance et la libération de la bande passante. En ce qui concerne la faisabilité d'un réseau hétérogène mélangeant des terminaux LoRaWAN et LoRa+, il peut être obtenu en codant le message envoyé par la passerelle aux terminaux pendant la fenêtre RX2. Le terminal basé sur LoRa+ devient donc capable de décoder le contenu du message contrairement au terminal LoRaWAN qui l'ignore.

Notons que les opérateurs évitent l'utilisation de la liaison descendante estimant que celle-ci perturbe le réseau. À notre avis, pour améliorer la QoS des réseaux LoRa, il nous semble opportun d'utiliser la liaison descendante d'une manière optimiste [116]. Dans ces travaux, les répéteurs LoRaWAN utilisent essentiellement la liaison descendante pour avoir une bonne QoS dans les endroits difficiles à atteindre (derrière des murs épais, dans les parkings au sous-sol, à l'intérieur des armoires métalliques, etc...).

Le protocole LoRa+ proposé dans ce chapitre n'a pas été implémenté faute de ressources qualifiées disponibles pendant la durée de cette thèse.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau protocole appelé LoRa+ afin d'améliorer la Qualité de Service de LoRaWAN. Après avoir présenté la technologie LoRa et ses classes, nous avons montré l'inconvénient de transmettre sur un canal avant de recevoir les bons paramètres par la passerelle. Cet inconvénient augmente le

taux de paquets rejetés au sein du réseau LoRaWAN et diminue la couverture radio de la passerelle. Après avoir présenté l'architecture de la norme LoRaWAN, le protocole LoRa+ proposé est illustré et expliqué avant de passer à la configuration de notre modèle de système pour comparer LoRaWAN et LoRa+ dans différents scénarios (urbain et rural). Les résultats montrent l'efficacité du nouveau protocole LoRa+ par rapport à LoRaWAN. LoRa+ améliore la QoS, permet de réduire le nombre de passerelles dans une zone jusqu'à 80% par rapport à LoRaWAN, améliore la couverture radio de la passerelle et réduit les collisions et les interférences jusqu'à 20% par rapport à LoRaWAN.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse des principales conclusions issues des travaux de cette thèse et nous proposons quelques points d'amélioration à entreprendre par LoRa+.

Conclusions

Face à l'accroissement de la population urbaine et à la conséquente surcharge des réseaux urbains, la ville de demain devra relever de nombreux défis, dans un souci de développement durable. Pour répondre aux problématiques de gestion des ressources, les villes devront s'appuyer sur un ensemble de solutions basées sur les technologies de l'information et de la communication (ICT). Les travaux développés dans le cadre de cette thèse ont justement pour but de répondre à ces problématiques, en exploitant les performances des réseaux à large couverture et à faible puissance (LPWAN) dans le contexte émergent des Villes Intelligentes.

Nous avons d'abord présenté un état de l'art sur les projets de Villes intelligentes et les principaux types de réseaux LPWAN. Nous avons comparé la performance au niveau de la couche MAC des trois technologies LPWAN présentes sur le marché (LoRa, Sigfox et NB-IoT) et nous nous sommes intéressés à la technologie LoRa, notamment son protocole ouvert LoRaWAN, dans le but d'améliorer la qualité de service de la couche physique et la couche MAC de LoRa dans différents scénarios d'urbanisation. Nous avons identifié des verrous à lever pour la technologie LoRa : le taux de paquets rejetés, les collisions et le nombre de passerelles déployées. Nous avons établi une nouvelle approche : rendre le protocole opportuniste en écoutant les caractéristiques du canal avant de transmettre et en déplaçant la fenêtre de réception RX2 avant la fenêtre de transmission. Nous avons montré par des simulations que notre modification améliore considérablement la QoS en termes de taux de paquets rejetés et de PER dépassant 20% pour chacun d'eux par rapport à LoRaWAN. En conséquence, le nombre de passerelles requis sur le réseau est également réduit, ce qui entraîne une

réduction des coûts d'infrastructure du réseau.

Perspectives

Nous estimons que l'essor des Villes Intelligentes favorise l'utilisation des objets communicants et créant de nouvelles opportunités pour les technologies LPWAN. En ce sens, ce travail de thèse est une contribution sur une voie qui n'en est qu'à ses débuts, et les axes d'amélioration des performances des réseaux LPWAN sont nombreux. Ces axes sont divisés en deux catégories : perspectives pour LPWAN et perspectives pour LoRa. Citons les principaux ci-après :

- * **Gestion de l'interopérabilité des terminaux LPWAN** : l'interopérabilité est un enjeu crucial pour le bon fonctionnement des réseaux surtout pour les réseaux LPWAN. Pour résoudre le problème d'hétérogénéité, la solution pourra être dans le mécanisme de compression des en-têtes (SCHC : Static Context Header Compression [117]) en tant qu'une couche d'adaptation entre la couche réseau et la couche MAC. Le mécanisme SCHC utilise un contexte dans lequel les informations d'en-tête sont conservées dans l'ordre des formats d'en-tête. Ce contexte est statique (les valeurs des champs d'en-tête ne changent pas dans le temps) évitant des mécanismes de resynchronisation complexes, incompatibles avec les caractéristiques LPWAN. L'intégration de ce mécanisme permettra au réseau de gérer l'hétérogénéité.
- * **Étude de l'efficacité énergétique de LoRa+** : les réseaux LPWA sont principalement axés sur l'efficacité énergétique et une couverture étendue des applications IoT ne nécessitant pas une bande passante importante. Il serait donc intéressant d'étudier l'efficacité énergétique du LoRa+ et la comparer avec LoRa-WAN, surtout après la suppression du ACK dans LoRa+ qui doit avoir un impact positif sur l'autonomie du terminal en raison de la réduction de la puissance et la libération de la bande passante.
- * **Intégration de LoRa+ dans les réseaux 5G** : le développement et le déploiement de la 5ème génération de réseaux mobiles (5G) sont en cours de déploiement. Entre autres, la nouvelle technologie fournira une capacité énorme qui peut être utilisée pour permettre la connectivité du cœur de réseau pour les LPWAN. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir la possibilité d'intégrer parfaitement les

réseaux LPWA à la prochaine 5G. Les auteurs de [118] ont intégré le protocole LoRaWAN au coeur du réseau de test 5G (5GTN) fonctionnant à l'Université d'Oulu, en Finlande. Il serait intéressant d'investiguer l'intégration du LoRa+ au réseau 5G.

- * **Allocation dynamique de spectre dans LoRaWAN** : la réglementation dans les bandes ISM concernant le cycle de service a un impact significatif sur la capacité du réseau. L'une des orientations futures les plus prometteuses pourrait être l'inclusion de l'allocation dynamique du spectre (Dynamic Spectrum Allocation) dans la norme LoRaWAN. En effet, LoRaWAN n'a pas été conçu pour fonctionner dans les espaces blancs des téléviseurs (TVWS). À l'avenir, l'inclusion de l'allocation dynamique de spectre dans la norme LoRaWAN entraînerait une réduction importante de la consommation d'énergie en utilisant les bandes basses de fréquences : 1- allongement des distances de liaison grâce à la réduction de l'affaiblissement de propagation, 2- réduction de la sensibilité aux effets environnementaux (affaiblissement dû à la pluie, tempêtes et typhons).

Mise en œuvre du protocole LoRa+ par « SPIE CityNetworks »

La société « SPIE CityNetworks », leader des services multi techniques et de l'aménagement des territoires, conçoit et réalise des projets innovants et complexes répondant à l'ensemble des exigences de la ville et des territoires de demain relevant d'un haut niveau de technicité : réseaux de stations de vélo ou de recharge de la voiture électrique (flottes de véhicules électriques privées et publiques), réseaux télécoms et hauts débits, réseaux d'éclairage urbain connectés, bâtiment à énergie positive (soit à très faible consommation d'énergie). Dans une démarche d'innovation constante, la société « SPIE CityNetworks » poursuit ses travaux de recherche dans le but de répondre aux enjeux et aux préoccupations exprimées des citoyens et usagers des villes et territoires. En effet, ces derniers traversent une véritable transformation numérique, et la technologie, et en son cœur les données, permettent d'en gérer efficacement les actifs et les ressources, avec un objectif d'améliorer le mode de vie des habitants. « SPIE CityNetworks » en mettant en place de nouvelles solutions de réseaux d'objets connectés basé sur le protocole LoRa+, participe à ces nouvelles organisations des

collectivités. Cette démarche technologique de « SPIE CityNetworks » se traduit par l'implémentation du protocole LoRa+ sur un radio logiciel définie (Software Defined Radio), afin d'évaluer sa performance à l'aide d'évaluations expérimentales dans des conditions réalistes.

La mise en œuvre du protocole LoRa+ est une perspective pour la société SPIE CityNetworks. Pour la suite des travaux de cette thèse, « SPIE CityNetworks » va s'engager à implémenter et standardiser le protocole LoRa+ avec la filiale « SPIE ICS » spécialisée dans la transformation digitale. En ce qui concerne l'hétérogénéité des terminaux LoRaWAN et LoRa+, une solution peut être envisagé en codant le message envoyé par la passerelle aux terminaux durant la fenêtre RX2. Le terminal LoRa+ devient donc capable de décoder le contenu du message contrairement au terminal LoRaWAN qui l'ignore. En plus, l'immigration de LoRaWAN vers LoRa+ dans un réseau déjà déployé consiste à réaliser un logiciel (firmware) qui sera envoyé par la passerelle aux terminaux en tant qu'une mise à jour.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revue internationale avec comité de lecture

- * **H. Mroue**, G. Andrieux, E. Motta Cruz, G. Rouyer, "Evaluation of LPWAN technology for Smart City," *European Alliance for Innovation-EAI Endorsed Transactions on Smart Cities*, Volume 2, Issue 6, Dec 2017.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- * **H. Mroue**, A. Nasser, S. Hamrioui, B. Parrein, E. Motta-Cruz and G. Rouyer, "MAC layer-based evaluation of IoT technologies : LoRa, SigFox and NB-IoT," in *IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, Jounieh, 2018, pp. 1-5.
- * **H. Mroue**, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Motta-Cruz and G. Rouyer, "Analytical and Simulation study for LoRa Modulation," in *25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, St. Malo, 2018, pp. 655-659.

Conférences nationales

- * **H. Mroue**, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Motta-Cruz and W. VINCE, "LoRa+ : évolution du protocole LoRaWAN pour l'amélioration de la QoS pour des réseaux denses de capteurs", in *Journée GdR RSD et SOC2 : Journée Systèmes Embarqués et Objets Communicants*, Paris, France, Apr 2019.
- * **H. Mroue**, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Motta-Cruz and W. VINCE, "LoRa+ : évolution du protocole LoRaWAN pour l'amélioration de la QoS", in *Journées thématiques GDR RSD ResCom : Low-Power Wide Area Networks (LPWAN)*, Lyon, France, Jul 2019.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NOKIA, *LTE evolution for IoT connectivity*, <https://onestore.nokia.com/asset/200178>, 2017.
- [2] X. XIONG et al., « Low power wide area machine-to-machine networks : key techniques and prototype », in : *IEEE Communications Magazine* 53.9 (sept. 2015), p. 64–71, ISSN : 0163-6804, DOI : 10.1109/MCOM.2015.7263374.
- [3] ERICSSON, *5G radio access*, <https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf>, 2016.
- [4] F. ADELANTADO AND X. VILAJOSANA AND P. TUSET-PEIRO AND B. MARTINEZ AND J. MELIA-SEGUI AND T. WATTEYNE, « Understanding the Limits of LoRaWAN », in : *IEEE Communications Magazine* 55.9 (sept. 2017), p. 34–40, ISSN : 0163-6804, DOI : 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [5] LoRa ALLIANCE, *LoRaWAN Specification v1.1*”, 2017, <https://lora-alliance.org/>, 2017.
- [6] SIGFOX, *Sigfox, the world's leading IoT services provider*, <https://www.sigfox.com>, 2019.
- [7] United Nations-Department of ECONOMIC et Social AFFAIRS, *World population Prospects. The 2015 revision : Key Findings and Advance Tables*, https://population.un.org/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf, 2015.
- [8] United Nations-Department of ECONOMIC et Social AFFAIRS, *World population Prospects. The 2014 revision : Highlights*, https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf, 2019.
- [9] United Nations Environment PROGRAMME, *Visions for Change. Recommendations for Effective Policies on Sustainable Lifestyles*, <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8009>, 2011.
- [10] United NATIONS, *Population urbaine (% du total)*, <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/sp.urb.totl.in.zs>, Accessed : Aug. 30, 2019.

-
- [11] International Telecommunications Union (ITU), *Smart Sustainable Cities : An Analysis of Definitions*, https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ssc/Documents/Approved_Deliverables/TR-Definitions.docx, 2014.
- [12] International Standards Organization (ISO), *Smart Cities Preliminary Report 2014*, https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/developing_standards/docs/en/smart_cities_report-jtc1.pdf, 2014.
- [13] M. WEBER, D. LUČIĆ et I. LOVREK, « Internet of Things context of the smart city », in : *2017 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, oct. 2017, p. 187–193, DOI : 10.1109/SST.2017.8188693.
- [14] O. VERSMAN et P. FRIESS, « Internet of Things—From Research and Innovation to Market Deployment », in : *River Publisher : Gistrup, Denmark (2014)*.
- [15] H. Van der VEER et A. WILES, « ETSI White paper No. 3 Achieving Technical Interoperability—The ETSI Approach », in : *European Telecommunications Standards Institute (ETSI) : Sophia Antipolis, France (2008)*.
- [16] *GRAND LYON la métropole*, <https://www.grandlyon.com/projets/projets-urbains.html>.
- [17] *OPTICITIES ENHANCING SMART MOBILITY*, <http://www.opticities.com/consortium/partners/spie/>.
- [18] S. LATRE AND P. LEROUX AND T. COENEN AND B. BRAEM AND P. BALLON AND P. DEMEESTER, « City of things : An integrated and multi-technology testbed for IoT smart city experiments », in : *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, sept. 2016, p. 1–8, DOI : 10.1109/ISC2.2016.7580875.
- [19] *SMART SANTANDER*, <http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santandersummary>.
- [20] *The Smart City Project in Santander*, <http://www.sensorsmag.com/components/smart-city-project-santander>.
- [21] *Amsmarterdam Smart City*, <https://amsterdamsmartcity.com/projects>.

-
- [22] A. ANTONIĆ AND V. BILAS AND M. MARJANOVIĆ AND M. MATIJAŠEVIĆ AND D. OLETIĆ AND M. PAVELIĆ AND I. P. ŽARKO AND K. PRIPUŽIĆ AND L. SKORIN-KAPOV, « Urban crowd sensing demonstrator : Sense the Zagreb Air », in : *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, sept. 2014, p. 423–424, DOI : 10.1109/SOFTCOM.2014.7039132.
- [23] A. W. BURANGE et H. D. MISALKAR, « Review of Internet of Things in development of smart cities with data management privacy », in : *2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications*, mar. 2015, p. 189–195, DOI : 10.1109/ICACEA.2015.7164693.
- [24] V. DURANI, *City of Rio de Janeiro and IBM Collaborate to Advance Emergency Response System*, <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35945.wss>, Nov. 2011, Accessed : Aug. 30, 2019.
- [25] D.C. SHOUP, « Cruising for parking », in : *transp. policy* 13.1 (2006), p. 479–486.
- [26] D. Baker J. LEE et D. AGDAS, « Cruising for parking : New empirical evidence and influential factors on cruising time », in : *The Journal Of Transport And Land Use* 10.1 (2017), p. 931–943.
- [27] « Protection of Natural Persons with Regard to the Processing of Personal Data and on the Free Movement of Such Data, and Repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) », in : *REGULATION (EU) 2016/679; Official Journal of the European* (2016), DOI : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.119.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:119:TOC.
- [28] « Protection of Natural Persons with Regard to the Processing of Personal Data by Competent Authorities for the Purposes of the Prevention, Investigation, Detection or Prosecution of Criminal Offences or the Execution of Criminal Penalties, and on the Free Movement of Such Data, and Repealing Council Framework Decision 2008/977/JHA. », in : *DIRECTIVE (EU) 2016/680; Official Journal of the European* (2016), DOI : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3A0J.L_.2016.119.01.0089.01.ENG.

-
- [29] European COMMISSION, « Lighting the Cities : Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities », in : *DIRECTIVE (EU) 2016/680; Official Journal of the European* (European Commission : Brussels, Belgium, 2013), DOI : <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/new-commission-report-lighting-cities-accelerating-deployment-innovative-lighting-european>.
- [30] European COMMISSION, « A Digital Agenda for Europe », in : *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions* (2010), DOI : [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52010DC0245R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52010DC0245R(01)).
- [31] Y.F. HUANG AND B.W. BAETZ AND G.H. HUANG AND L. LIU, « Violation analysis for solid waste management systems : an interval fuzzy programming approach », in : *Journal of Environmental Management* 65.4 (2002), p. 431–446, ISSN : 0301-4797, DOI : <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0566>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479702905669>.
- [32] A. VAKALI, L. ANGELIS et M. GIATSOGLOU, « Sensors talk and humans sense Towards a reciprocal collective awareness smart city framework », in : *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, juin 2013, p. 189–193, DOI : 10.1109/ICCW.2013.6649226.
- [33] *Weightless*, <http://www.weightless.org/>.
- [34] INGENU, *RPMA technology for the Internet of Things*, http://theinternetofthings.report/Resources/Whitepapers/4cbc5e5e-6ef8-4455-b8cd-f6e3888624cb_RPMA%20Technology.pdf, 2016.
- [35] Girts STRAZDINS et al., « Wireless Sensor Network Operating System Design Rules Based on Real-World Deployment Survey », in : *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2.3 (2013), p. 509–556, ISSN : 2224-2708, DOI : 10.3390/jsan2030509, URL : <http://www.mdpi.com/2224-2708/2/3/509>.
- [36] Felix Jonathan OPPERMAN, Carlo Alberto BOANO et Kay RÖMER, « A Decade of Wireless Sensing Applications : Survey and Taxonomy », in : *The Art of Wireless Sensor Networks : Volume 1 : Fundamentals*, sous la dir. d'Habib M. AMMARI, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 11–

-
- 50, ISBN : 978-3-642-40009-4, DOI : 10.1007/978-3-642-40009-4_2, URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-40009-4_2.
- [37] I. DEMIRKOL, C. ERSOY et F. ALAGOZ, « MAC protocols for wireless sensor networks : a survey », in : *IEEE Communications Magazine* 44.4 (avr. 2006), p. 115–121, ISSN : 0163-6804, DOI : 10.1109/MCOM.2006.1632658.
- [38] GIUSEPPE ANASTASI, MARCO CONTI, MARIO DI FRANCESCO AND ANDREA PASSARELLA, « Energy conservation in wireless sensor networks : A survey », in : *Ad Hoc Networks* 7.3 (2009), p. 537–568, ISSN : 1570-8705, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.06.003>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870508000954>.
- [39] S. Kirtay J. BURNS et P. MARKS, *Future use of licence exempt radio spectrum*, http://www.plumconsulting.co.uk/pdfs/Plum_July_2015_Future_use_of_Licence_Exempt_Radio_Spectrum.pdf, 2015.
- [40] V. RAGHUNATHAN, S. GANERIWAL et M. SRIVASTAVA, « Emerging techniques for long lived wireless sensor networks », in : *IEEE Communications Magazine* 44.4 (avr. 2006), p. 108–114, ISSN : 0163-6804, DOI : 10.1109/MCOM.2006.1632657.
- [41] USMAN RAZA, ALESSANDRO BOGLIOLO, VALERIO FRESCHI, EMANUELE LATANZI AND AMY L. MURPHY, « A two-prong approach to energy-efficient WSNs : Wake-up receivers plus dedicated, model-based sensing », in : *Ad Hoc Networks* 45 (2016), p. 1–12, ISSN : 1570-8705, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.03.005>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870516300749>.
- [42] Zecheng XIE, Rongtao XU et Lei LEI, « A study of clear channel assessment performance for low power wide area networks », in : *10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014)*, sept. 2014, p. 311–315, DOI : 10.1049/ic.2014.0119.
- [43] PIYARE, RAJEEV AND MURPHY, AMY L. AND MAGNO, MICHELE AND BENINI, LUCA, « On-Demand LoRa : Asynchronous TDMA for Energy Efficient and Low Latency Communication in IoT », in : *Sensors* 18.11 (2018), ISSN : 1424-8220, DOI : 10.3390/s18113718, URL : <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3718>.

-
- [44] K. E. NOLAN AND M. Y. KELLY AND M. NOLAN AND J. BRADY AND W. GUIBENE, « Techniques for resilient real-world IoT », in : *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, sept. 2016, p. 222–226, DOI : 10.1109/IWCMC.2016.7577061.
- [45] JEBRIL, AKRAM H. AND SALI, ADUWATI AND ISMAIL, ALYANI AND RASID, MOHD FADLEE A., « Overcoming Limitations of LoRa Physical Layer in Image Transmission », in : *Sensors* 18.10 (2018), ISSN : 1424-8220, DOI : 10.3390/s18103257, URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3257>.
- [46] *OpenFog*, <https://www.openfogconsortium.org/>, 2016.
- [47] *Mobile edge Computing*, <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile-edge-computing>, 2016.
- [48] Huawei TECHNOLOGY, *NB-IoT-enabling new business opportunities*, <http://www.huawei.com/minisite/4-5g/img/NB-IOT.pdf>, 2015.
- [49] U.K. GSMA MOBILE IOT London, *Mobile Internet of Things low power wide area connectivity*, <http://www.gsma.com/connectedliving/wp-content/uploads/2016/03/Mobile-IoT-Low-Power-Wide-Area-Connectivity-GSMA-Industry-Paper.pdf>, 2016.
- [50] *Cellular networks for massive IoT : Enabling low power wide area applications*, https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iiot.pdf, 2016.
- [51] BOR, MARTIN C. AND ROEDIG, UTZ AND VOIGT, THIEMO AND ALONSO, JUAN M., « Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale ? », in : *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16*, Malta, Malta : ACM, 2016, p. 59–67, ISBN : 978-1-4503-4502-6, DOI : 10.1145/2988287.2989163, URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2988287.2989163>.
- [52] K. MIKHAYLOV, JUHA. PETAEJAEJAERVI AND T. HAENNINEN, « Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology », in : *European Wireless 2016 ; 22th European Wireless Conference*, mai 2016, p. 1–6.

-
- [53] K. E. NOLAN, W. GUIBENE et M. Y. KELLY, « An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things », in : *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, sept. 2016, p. 439–444, DOI : 10.1109/IWCMC.2016.7577098.
- [54] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), *Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT) (Release 13)*, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/45series/45.820/>, 2015.
- [55] E. Westerberg S. LANDSTRÖM J. Bergström et D.HAMMARWALL, *NB-IoT : a sustainable technology for connecting billions of devices*, <https://www.ericsson.com/assets/local/publications/ericsson-technology-review/docs/2016/etr-narrowband-iot.pdf>, 2016.
- [56] J. Schwarz D. ROHDE, *Narrowband Internet of Things Whitepaper*, https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf, 2016.
- [57] R. RATASUK AND N. MANGALVEDHE AND Y. ZHANG AND M. ROBERT AND J. KOSKINEN, « Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13 », in : *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, oct. 2016, p. 1–7, DOI : 10.1109/CSCN.2016.7785170.
- [58] *Semtech homepage*, <http://www.semtech.com>, 2017.
- [59] S. SFORZA, *Communications system. US Patent*, <https://www.google.com/patents/US8406275>, Mar. 26 2013.
- [60] H. MROUE AND A. NASSER AND B. PARREIN AND S. HAMRIOUI AND E. MONACRUZ AND G. ROUYER, « Analytical and Simulation study for LoRa Modulation », in : *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, juin 2018, p. 655–659, DOI : 10.1109/ICT.2018.8464879.
- [61] M. KOWATSCH et J. LAFFERL, « A Spread-Spectrum Concept Combining Chirp Modulation and Pseudonoise Coding », in : *IEEE Transactions on Communications* 31.10 (oct. 1983), p. 1133–1142, ISSN : 0090-6778, DOI : 10.1109/TCOM.1983.1095745.

-
- [62] A. SPRINGER AND M. HUEMER AND L. REINDL AND C. C. W. RUPPEL AND A. POHL AND F. SEIFERT AND W. GUGLER AND R. WEIGEL, « A robust ultra-broad-band wireless communication system using SAW chirped delay lines », in : *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 46.12 (déc. 1998), p. 2213–2219, ISSN : 0018-9480, DOI : 10.1109/22.739199.
- [63] M. KNIGHT et B. SEEGER, « Decoding LoRa : Realizing a Modern LPWAN with SDR », in : *6th GNU Radio Conference* (nov. 2016).
- [64] *LoRa™ Modulation Basics, AN1200.22*, <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>, 2016.
- [65] Semtech CORPORATION, *SX1301 Datasheet*, <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1301.pdf>, 2017 v2.01.
- [66] A. G. i AMAT, « SSY 125 Digital Communications, Lecture Notes », in : *Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology* (nov. 2015).
- [67] LoRa ALLIANCE, *LoRaWAN Specification*, <https://www.lora-alliance.org/lorawan-for-developers>, 2016.
- [68] S. LI, U. RAZA et A. KHAN, « How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN? », in : *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, déc. 2018, p. 206–212, DOI : 10.1109/GLOCOM.2018.8647469.
- [69] LoRa ALLIANCE, *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*, https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf, 2015.
- [70] W. AYOUB AND A. E. SAMHAT AND F. NOUVEL AND M. MROUE AND J. PRÉVOTET, « Internet of Mobile Things : Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility », in : *IEEE Communications Surveys Tutorials* (2018), p. 1–1, ISSN : 1553-877X, DOI : 10.1109/COMST.2018.2877382.
- [71] F. VAN DEN ABEELE AND J. HAXHIBEQIRI AND I. MOERMAN AND J. HOEBEKE, « Scalability Analysis of Large-Scale LoRaWAN Networks in ns-3 », in : *IEEE Internet of Things Journal* 4.6 (déc. 2017), p. 2186–2198, ISSN : 2327-4662, DOI : 10.1109/JIOT.2017.2768498.

-
- [72] Brecht REYNDERS, Qing WANG et Sofie POLLIN, « A LoRaWAN Module for Ns-3 : Implementation and Evaluation », in : *Proceedings of the 10th Workshop on Ns-3, WNS3 '18*, Surathkal, India : ACM, 2018, p. 61–68, ISBN : 978-1-4503-6413-3, DOI : 10.1145/3199902.3199913, URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3199902.3199913>.
- [73] D. MAGRIN, M. CENTENARO et L. VANGELISTA, « Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario », in : *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, mai 2017, p. 1–7, DOI : 10.1109/ICC.2017.7996384.
- [74] *LoRaSim : LoRaWAN partial network implementation*, <https://github.com/networkedsystems/lora-ns3>, accessed on 31 May 2019.
- [75] PASOLINI, GIANNI AND BURATTI, CHIARA AND FELTRIN, LUCA AND ZABINI, FLAVIO AND DE CASTRO, CRISTINA AND VERDONE, ROBERTO AND ANDRISANO, ORESTE, « Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies », in : *Sensors* 18.4 (2018), ISSN : 1424-8220, DOI : 10.3390/s18041118, URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1118>.
- [76] A. POP AND U. RAZA AND P. KULKARNI AND M. SOORIYABANDARA, « Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks ? », in : *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, déc. 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/GLOCOM.2017.8254509.
- [77] D. CROCE AND M. GUCCIARDO AND S. MANGIONE AND G. SANTAROMITA AND I. TINNIRELLO, « Impact of LoRa Imperfect Orthogonality : Analysis of Link-Level Performance », in : *IEEE Communications Letters* 22.4 (avr. 2018), p. 796–799, ISSN : 1089-7798, DOI : 10.1109/LCOMM.2018.2797057.
- [78] B. REYNDERS, W. MEERT et S. POLLIN, « Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication », in : *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, mai 2016, p. 1–6, DOI : 10.1109/ICT.2016.7500415.
- [79] COMTECHEFDATA, *Spread Spectrum in the SLM-5650A : Features, Performance, and Applications*, https://www.comtechefdata.com/files/articles_papers/WP-Spread-Spectrum-in-SLM-5650A.pdf, Oct 2012.

-
- [80] KAIS MEKKI AND EDDY BAJIC AND FREDERIC CHAXEL AND FERNAND MEYER, « A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment », in : *ICT Express* 5.1 (2019), p. 1–7, ISSN : 2405-9595, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>.
- [81] Luigi ATZORI, Antonio IERA et Giacomo MORABITO, « The Internet of Things : A survey », in : *Computer Networks* 54.15 (2010), p. 2787–2805, ISSN : 1389-1286, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.
- [82] Rashmi Sharan SINHA, Yiqiao WEI et Seung-Hoon HWANG, « A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT », in : *ICT Express* 3.1 (2017), p. 14–21, ISSN : 2405-9595, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>.
- [83] P. NEUMANN, J. MONTAVONT et T. NOËL, « Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN) : A LoRaWAN case study », in : *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, oct. 2016, p. 1–8, DOI : 10.1109/WiMOB.2016.7763213.
- [84] B. VEJLGAARD AND M. LAURIDSEN AND H. NGUYEN AND I. Z. KOVACS AND P. MOGENSEN AND M. SORENSEN, « Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT », in : *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, juin 2017, p. 1–5, DOI : 10.1109/VTCSpring.2017.8108666.
- [85] A. CENEDESE AND A. ZANELLA AND L. VANGELISTA AND M. ZORZI, « Padova Smart City : An urban Internet of Things experimentation », in : *Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014*, juin 2014, p. 1–6, DOI : 10.1109/WoWMoM.2014.6918931.
- [86] M. CENTENARO AND L. VANGELISTA AND A. ZANELLA AND M. ZORZI, « Long-range communications in unlicensed bands : the rising stars in the IoT and smart city scenarios », in : *IEEE Wireless Communications* 23.5 (oct. 2016), p. 60–67, ISSN : 1536-1284, DOI : 10.1109/MWC.2016.7721743.

-
- [87] C. GOURSAUD et Y. MO, « Random unslotted time-frequency ALOHA : Theory and application to IoT UNB networks », in : *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, mai 2016, p. 1–5, DOI : 10.1109/ICT.2016.7500489.
- [88] H. LIESKE AND G. KILIAN AND M. BREILING AND S. RAUH AND J. ROBERT AND A. HEUBERGER, « Decoding Performance in Low-Power Wide Area Networks With Packet Collisions », in : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15.12 (déc. 2016), p. 8195–8208, ISSN : 1536-1276, DOI : 10.1109/TWC.2016.2613079.
- [89] SIGFOX, *Sigfox Radio Technology Keypoints*, <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>.
- [90] Telit wireless SOLUTIONS, *LE51-868 S RF Module User Guide*, http://www.artbrno.cz/download/telit/Telit_LE51-868_S_RF_Module_User_Guide_r1.pdf, rev. 1, Apr 20114.
- [91] A. PAPOULIS, « Probability, Random Variables, and Stochastic Processes », in : *McGraw-Hill Series in Electrical Engineering*, t. Third Edition, 1991.
- [92] H. MROUE AND A. NASSER AND S. HAMRIOUI AND B. PARREIN AND E. MOTTA-CRUZ AND G. ROUYER, « MAC layer-based evaluation of IoT technologies : LoRa, SigFox and NB-IoT », in : *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, avr. 2018, p. 1–5, DOI : 10.1109/MENACOMM.2018.8371016.
- [93] ARCEP, *Qualité des services mobiles*, <https://www.arcep.fr/actualites/les-communiqués-de-presse/detail/n/qualite-des-services-mobiles-1.html>, 17 octobre 2018.
- [94] T. PETRIĆ AND M. GOESSENS AND L. NUAYMI AND L. TOUTAIN AND A. PELOV, « Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN », in : *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, sept. 2016, p. 1–7, DOI : 10.1109/PIMRC.2016.7794569.
- [95] O. GEORGIU et U. RAZA, « Low Power Wide Area Network Analysis : Can LoRa Scale ? », in : *IEEE Wireless Communications Letters* 6.2 (avr. 2017), p. 162–165, ISSN : 2162-2337, DOI : 10.1109/LWC.2016.2647247.

-
- [96] V. GUPTA AND S. K. DEVAR AND N. H. KUMAR AND K. P. BAGADI, « Modelling of IoT Traffic and Its Impact on LoRaWAN », in : *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, déc. 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/GLOCOM.2017.8254512.
- [97] D. BANKOV, E. KHOROV et A. LYAKHOV, « Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture effect », in : *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, oct. 2017, p. 1–5, DOI : 10.1109/PIMRC.2017.8292748.
- [98] D. BANKOV, E. KHOROV et A. LYAKHOV, « Mathematical model of LoRaWAN channel access », in : *2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, juin 2017, p. 1–3, DOI : 10.1109/WoWMoM.2017.7974300.
- [99] J. PETÄJÄJÄRVI AND K. MIKHAYLOV AND M. PETTISSALO AND J. IINATTI, « Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology : Doppler robustness, scalability, and coverage », in : *International Journal of Distributed Sensor Networks*, t. 13, 3, 2017, p. 1–16, DOI : <https://doi.org/10.1177/1550147717699412>.
- [100] S. WANG AND Y. CHEN AND T. CHEN AND C. CHANG AND Y. CHENG AND C. HSU AND Y. LIN, « Performance of LoRa-Based IoT Applications on Campus », in : *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, sept. 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/VTCFall.2017.8288154.
- [101] M. RIZZI AND P. FERRARI AND A. FLAMMINI AND E. SISINNI, « Evaluation of the IoT LoRaWAN Solution for Distributed Measurement Applications », in : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 66.12 (déc. 2017), p. 3340–3349, ISSN : 0018-9456, DOI : 10.1109/TIM.2017.2746378.
- [102] P. JÖRKE AND S. BÖCKER AND F. LIEDMANN AND C. WIETFELD, « Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz », in : *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, oct. 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/PIMRC.2017.8292708.

-
- [103] P. J. RADCLIFFE AND K. G. CHAVEZ AND P. BECKETT AND J. SPANGARO AND C. JAKOB, « Usability of LoRaWAN Technology in a Central Business District », in : *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, juin 2017, p. 1–5, DOI : 10.1109/VTCspring.2017.8108675.
- [104] Sungryul KIM et Younghwan YOO, « Contention-Aware Adaptive Data Rate for Throughput Optimization in LoRaWAN », in : *Sensors* 18.6 (2018), ISSN : 1424-8220, DOI : 10.3390/s18061716, URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1716>.
- [105] K. MIKHAYLOV, J. PETÄJÄJÄRVI et A. POUTTU, « Effect of Downlink Traffic on Performance of LoRaWAN LPWA Networks : Empirical Study », in : *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, sept. 2018, p. 1–6, DOI : 10.1109/PIMRC.2018.8580721.
- [106] SANCHEZ-IBORRA, RAMON AND SANCHEZ-GOMEZ, JESUS AND BALLESTA-VIÑAS, JUAN AND CANO, MARIA-DOLORES AND SKARMETA, ANTONIO F., « Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions », in : *Sensors* 18.3 (2018), ISSN : 1424-8220, DOI : 10.3390/s18030772, URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/772>.
- [107] N. EL RACHKIDY, A. GUITTON et M. KANEKO, « Collision Resolution Protocol for Delay and Energy Efficient LoRa Networks », in : *IEEE Transactions on Green Communications and Networking* 3.2 (juin 2019), p. 535–551, ISSN : 2473-2400, DOI : 10.1109/TGCN.2019.2908409.
- [108] VOIGT, THIEMO AND BOR, MARTIN AND ROEDIG, UTZ AND ALONSO, JUAN, « Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks », in : *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, EWSN ’17, Uppsala, Sweden : Junction Publishing, 2017, p. 323–328, ISBN : 978-0-9949886-1-4, URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3108009.3108093>.
- [109] Z. QIN et J. A. MCCANN, « Resource Efficiency in Low-Power Wide-Area Networks for IoT Applications », in : *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, déc. 2017, p. 1–7, DOI : 10.1109/GLOCOM.2017.8254800.

-
- [110] M. BOR et U. ROEDIG, « LoRa Transmission Parameter Selection », in : *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, juin 2017, p. 27–34, DOI : 10.1109/DCOSS.2017.10.
- [111] F. CUOMO AND M. CAMPO AND A. CAPONI AND G. BIANCHI AND G. ROSSINI AND P. PISANI, « EXPLoRa : Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations », in : *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, oct. 2017, p. 1–8, DOI : 10.1109/WiMOB.2017.8115779.
- [112] DASH7 ALLIANCE STD, *DASH7 Alliance Protocol Specification v1.1*, <http://www.dash7-alliance.org/dash7-allianceprotocol-specification-v1-1-ready-for-download>.
- [113] ETSI, « Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio Network Planning Aspects (3GPP TR 03.30 version 8.4.0 Release 1999) », in : *ETSI TR 101 362 V8.4.0*, June 2005.
- [114] N. VARSIER et J. SCHWOERER, « Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications », in : *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, mai 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/ICC.2017.7996383.
- [115] K. MIKHAYLOV, J. PETÄJÄJÄRVI et J. JANHUNEN, « On LoRaWAN scalability : Empirical evaluation of susceptibility to inter-network interference », in : *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, juin 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/EuCNC.2017.7980757.
- [116] Q. LAMPIN, T. ANSANAY et D. BARTHEL, « LoRaWAN® repeaters », in : *Journées thématiques GDR RSD ResCom : Low-Power Wide Area Networks (LP-WAN)*, Lyon, juil. 2019, URL : <http://lpwan.conf.citi-lab.fr/pres/barthel.pdf>.
- [117] A. MINABURO AND L. TOUTAIN AND C. GOMEZ AND D. BARTHEL AND J. ZUNIGA, « Static Context Header Compression (SCHC) and fragmentation for LP-WAN, application to UDP/IPv6 », in : *draft-ietf-lpwan-ipv6-static-context-hc-21 (work in progress)*, juil. 2019.
- [118] R. YASMIN AND J. PETÄJÄJÄRVI AND K. MIKHAYLOV AND A. POUTTU, « On the integration of LoRaWAN with the 5G test network », in : *2017 IEEE 28th Annual*

International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), oct. 2017, p. 1–6, DOI : 10.1109/PIMRC.2017.8292557.

- [119] J. PETAJAJARVI, K. MIKHAYLOV, A. ROIVAINEN, T. HANNINEN AND M. PETTIS-SALO, « On the coverage of LPWANS : range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology », in : *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, déc. 2015, p. 55–59, DOI : 10.1109/ITST.2015.7377400.

Titre : Développement de réseaux radio d'objets connectés pour les Villes Intelligentes : amélioration de la Qualité de Service du réseau LoRa

Mot clés : Réseau étendu à faible puissance, Villes Intelligentes, LoRaWAN, Qualité de Service

Resumé : L'objectif de cette thèse est la mise au point de nouveaux mécanismes pour améliorer la qualité de service des réseaux LPWAN dans le contexte des Villes Intelligentes. Dans un premier temps, nous analysons l'évolution de la qualité de service en observant le taux de paquets erronés (PER) de la couche MAC de différents standards LPWAN, soumise à la densification des réseaux. Dans un deuxième temps, nous nous concentrons sur la technologie LoRa et nous identifions les verrous à lever, notamment le taux de paquets rejetés, les collisions entre paquets et le nombre de passerelles déployées, dans différents scénarios

de densification des réseaux. Nous introduisons alors un nouveau protocole appelé LoRa+ basé sur « l'écoute avant de parler » (Listen Before Talk, LBT). Enfin, nous utilisons des outils et métriques issus du modèle « Okumura-Hata » afin d'analyser et comparer les performances de ce nouveau protocole avec LoRa au sein de plusieurs types de réseaux, et nous démontrons que LoRa+ s'avère être un choix opportun, permettant de réduire à la fois les taux de paquets rejetés et erronés ainsi que le nombre des passerelles déployées dans les réseaux.

Title : Development of connected objects radio networks for Smart Cities : improvement of the Quality of Service of LoRa network

Keywords : Low Power Wide Area Network, Smart Cities, LoRaWAN, Quality of Service

Abstract : The objective of this thesis is the development of new mechanisms to improve the quality of service for LPWAN in the context of Smart Cities. First, we analyze the evolution of the quality of service by observing the packet error rate (PER) of the MAC layer of different LPWAN standards, subject to network densification. Second, we focus on LoRa technology, where we identify obstacles to be raised, including the rate of rejected packets, the collisions between packets and the number of

gateways deployed, in different network densification scenarios. We then introduce a new protocol called LoRa+ based on «Listening Before Talking, LBT». Finally, we use « Okumura-Hata » tools and metrics to analyze and compare the performance of this new protocol with LoRa in several types of networks, and we demonstrate that LoRa+ proves to be a timely choice, reducing both rejected packet rate and packet error rate as well as the number of gateways deployed in networks.